

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Deni Džafo

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Deni Džafo

Zagreb, 2010.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno sa stečenim znanjem i
navedenom literaturom*

Zahvaljujem prof. dr. sc. Željku Šitumu, dipl. ing. na ukazanom povjerenju prihvaćanjem mentorstva za ovaj rad i korisnim savjetima.

Zahvaljujem dipl. ing. Saši Doziću, na korisnim savjetima, materijalima te ustupanju potrebne programske podrške.

Svojim roditeljima dugujem posebnu zahvalu za svu potporu koju su mi pružili tokom školovanja.

ZADATAK

SAŽETAK

U ovom radu, istraženi su, projektirani i simulacijski ispitani različiti slučajevi transporta sirove nafte na dionici Omišalj – Urinj. Opisane su glavne komponente sustava: spremnici, pumpe, cjevovod te karakteristike fluida (nafte). Simulirani su karakteristični slučajevi transporta nafte: pokretanje sustava, prekid transporta sirove nafte i kritični slučajevi opterećenja sustava zbog uočavanja mogućih neispravnosti u sustavu. U svrhu sprečavanja problema koji mogu nastati uzrokovani kratkotrajnim opterećenjima simulacijski je ugrađen upravljački sistem sastavljen od senzora, kontrolera i aktuatora.

Ključne riječi: transport nafte, komponente sustava, simulacija, upravljanje, kontroler

SADRŽAJ:

SAŽETAK	6
SADRŽAJ	7
POPIS SLIKA	8
POPIS TABLICA.....	10
POPIS SIMBOLA	11
1. UVOD	12
2. OPIS SUSTAVA JADRANSKOG NAFTOVODA (JANAF)	13
2.1 DIONICE JADRANSKOG NAFTOVODA	14
2.2 TERMINAL I LUKA OMIŠALJ	15
2.3 KOMPONENTE DIONICE OMIŠALJ – URINJ	17
2.3.1 SPREMNICI	18
2.3.2 PUMPE	20
2.3.3 CJEVOVOD.....	22
2.3.4 FLUID (NAFTA).....	24
3. SIMULACIJA SUSTAVA JANAF-a	27
3.1 SIMULACIJSKI PROGRAM <i>STONER PIPELINE SIMULATOR</i> (SPS)	27
3.2 POKRETANJE SUSTAVA	30
3.3 PREKID TRANSPORTA NAFTE.....	36
3.4 SLUČAJEVI KRATKOTRAJNOG OPTEREĆENJA SUSTAVA	39
3.5 TRANSPORT NAFTE OD URINJA DO OMIŠLJA.....	50
3.6 USPOREDBE.....	58
4. SUSTAV UPRAVLJANJA	60
4.1 UPRAVLJENJE PUMPOM.....	61
5. ZAKLJUČAK	66
PRILOG 1 (Shema dionice Omišalj - Urinj).....	Error! Bookmark not defined.
PRILOG 2 (Shema dionice Urinj - Omišalj).....	68
PRILOG 3 (logika upravljanja sustavom u simulacijskom programu SPS)	69
LITERATURA	70

POPIS SLIKA

Slika 1. Sustav JANAF-a	13
Slika 2. Luka i spremnici na Omišlju	16
Slika 3. Dionica naftovoda Omišalj – Urinj	17
Slika 4. Karakteristike Spremnika 'Om1' korištene u SPS-u	18
Slika 5. Karakteristike spremnika na Urinju korištene u SPS-u	19
Slika 6. Karakteristike pumpe OUP01	20
Slika 7. Karakteristika pumpe OUP02	21
Slika 8. Podaci za pumpu korišteni u simulacijskom programu <i>Stoner Pipeline Simulator</i> (SPS)	21
Slika 9. Visina cjevovoda i MAOP (ovisnost visine i tlaka s obzirom na udaljenost)	22
Slika 10. Podaci o cjevovodu (primjer PIP40_2)	22
Slika 11. Zadavanje elevacije cjevovoda	23
Slika 12. Način rada SPS-a	28
Slika 13. Shema dijagrama	29
Slika 14. Transfer od Om2 do Ur1 (nakon 12 sekundi)	31
Slika 15. Transfer nafte od Om2 do Ur1 (povećanje tlaka, vrijeme 1:03 sec)	32
Slika 16. Transfer nafte od Om2 do Ur1 (stabilizacija sustava, vrijeme 10 min)	32
Slika 17. Transfer nafte od Om1 do Ur4 (t = 0 min)	34
Slika 18. Transfer nafte od Om1 do Ur4 (stabilazacija sustava)	35
Slika 19. Transfer od Om2 do Ur2 (zaustavljanje pumpe, t = 12:06 min)	37
Slika 20. Transfer od Om2 do Ur2 (5 min nakon zaustavljanja pumpe)	37
Slika 21. Transfer od Om2 do Ur2 (Maksimalni tlak u sustavu)	38
Slika 22. Transfer od Om2 do Ur2 (nema transporta)	39
Slika 23. Transfer od Om2 (pun) do Ur2 (prazan, zatvaranje ventila, vrijeme t = 1:32 min)	41
Slika 24. Transfer od Om2 do Ur2 (tlak na ventilu na Omišlju)	41
Slika 25. Transfer od Om2 do Ur1 (Tlačni val, vrijeme 16:33 min)	43
Slika 26. Transfer od Om2 do Ur1 (Tlačni val prema Omišlju)	44

Slika 27. Transfer od Om2 do Ur1 (Tlačni val, vrijeme 16:33 min)	45
Slika 28. Transfer od Om2 do Ur1 (Maksimalni tlak u cjevovodu)	46
Slika 29. Transfer od Om2 do Ur2 (Zatvaranje ventila spremnika na Urinju)	47
Slika 30. Transfer od Om2 do Ur2 (maksimalni tlak u sustavu)	48
Slika 31. Transfer od Om2 do Ur3 (maksimalni tlak u sustavu)	49
Slika 32. Karakteristike slabijih pumpi na Urinju	50
Slika 33. Karakteristika treće pumpe na Urinju	51
Slika 34. Početno stanje cjevovoda (Ur-Om)	52
Slika 35. Gravitacijski protok (Ur-Om)	53
Slika 36. Pokretanje druge pumpe (Ur4-Om2, 2+0 konfig.)	54
Slika 37. Maksimalni tlak (Ur4-Om2)	54
Slika 38. Gravitacijski protok nakon gašenja cjevovoda (Ur4-Om2)	55
Slika 39. Zatvaranje izlaznog ventila na Urinju (Ur4-Om2)	56
Slika 40. Maksimalni tlak u sustavu kod gašenja pumpe (Ur4-Om2)	57
Slika 41. Usporedba maksimalnog tlaka u sustavu za različite slučajeve	58
Slika 42. Ovisnost visine i protoka o udaljenosti (stabilno stanje)	60
Slika 43. Upravljački sistem	61
Slika 44. Karakteristike senzora korištene u SPS-u	61
Slika 45. Karakteristike kotrolera korištene u SPS-u	62
Slika 46. Karakteristike aktuatora korištene u SPS-u	62
Slika 47. Smanjenje protoka uvjetovano kontrolerom ($t = 3$ min.)	63
Slika 48. Protok od $700 \text{ m}^3/\text{h}$	63
Slika 49. Protok od $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ ($t = 10:02$ min.)	64
Slika 50. Promjena brzine vrtnje	65
Slika 51. Promjena tlak	65
Slika 52. Promjena količine protoka	65

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dozvoljene visina tekućine u spremnicima	18
Tablica 2. Kapaciteti spremnika na terminalu Omišalj	19
Tablica 3. Karakteristike pumpi na Omišlju	20
Tablica 4. Zalihe nafte u svijetu	25
Tablica 5. Potrošnja nafte u svijetu	26
Tablica 6. Slučajevi protoka od Omišlja do Urinja	35

POPIS SIMBOLA

<u>Simbol</u>	<u>Opis</u>
V	volumen
l	duljina
P	snaga
σ	vlačna čvrstoća
p	tlak
ρ	gustoća
q_v	volumski protok
t	vrijeme
ω	brzina vrtnje, broj okretaja

1. UVOD

Sustav Jadranskog naftovoda glavni je sustav transporta sirove nafte na području Republike Hrvatske, ali i u cijeloj regiji jer snabdjeva naftom rafinerije u Bosni, Srbiji, Mađarskoj i Sloveniji. Tankeri, koji dolaze iz djelova Kaspijskog jezera, Crnog mora, ali i obala Afrike, pristaju u luku Omišalj iz koje se na dalje transportira nafta. Jedna od vodećih INA-inih rafinerija u Hrvatskoj je rafinerija u Rijeci, odnosno Urinju.

U ovom su radu pomoću simulacijskog programa *Stoner Pipeline Simulator* prikazani različiti slučajevi transporta nafte na dionici Omišalj – Urinj, stanja u cjevovodu (tlak, protok) za vrijeme rada sustava, ali i pri isključenju istoga. Ovim simulacijama se uočavaju mogući problemi pri transportu nafte. Tako zbog kratkotrajnih opterećenja uzrokovanih nepravilnim upravljanjem sustavom može doći do naglog zatvaranja ventila što prouzrokuje prekomjerno povećanje tlaka u cjevovodu. Visoki tlak u cjevovodu može dovesti do pucanja cijevi i ventila.

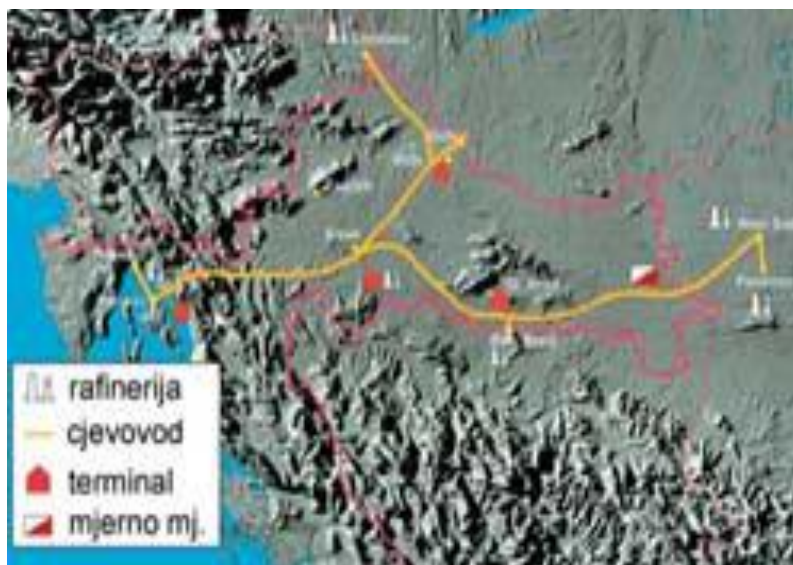
Stoga će se u sustav simulacijski ugraditi kontroler koji će regulirati protok odnosno tlak kojeg je u određenim slučajevima potrebno smanjiti ili povećati. Takvim upravljanjem spriječio bi se nastanak kvarova sustava te puknuća cijevi.

2. OPIS SUSTAVA JADRANSKOG NAFTOVODA (JANAF)

Sustav JANAF-a izgrađen je u razdoblju od 1975. god. do 1979. god., te pušten u rad u prosincu 1979. god., kao transportni sustav za sirovu naftu koji može prihvatiti i prevesti 20 milijuna tona nafte godišnje. [1]

Tijekom 25 godina rada sustav JANAF-a je dograđivan: reverziranje dionice Sisak – Virje – Gola (1989. god.), izgradnja podmorskog naftovoda Omišalj – Urinj (1995. god.) i izgradnja zaobilaznog naftovoda Slobodnica – Donja Vrba (1999. god.).

U razdoblju od početka rada do danas JANAF- je prevezao domaćim i stranim korisnicima više od 170 000 000 tona sirove nafte.



Slika 1. Sustav JANAF-a

2.1 DIONICE JADRANSKOG NAFTOVODA

Sustav JANAF-a izgrađen je kao međunarodni sustav transporta nafte od Luke i Terminala Omišalj do domaćih i inozemnih rafinerija u istočnoj i središnjoj Europi. [2]

Projektirani kapacitet cjevovoda iznosi 34 milijuna tona nafte godišnje (MTG), a instalirani 20 MTG.:

- Prihvatno – otpremnog Terminala Omišalj, na otoku Krku, na čijem jednom dijelu lučkog područja se nalazi Luka Omišalj (pripadajući dio bazena Luke Rijeka – pod ingerencijom Lučke uprave Rijeka);
- Prihvatno – otpremnih Terminala u Sisku, Virju i Slavonskom Brodu;
- Podmorskog naftovoda Omišalj – Urinj, koji povezuje Terminal Omišalj, s Rafinerijom Urinj (ukupne dužine 7.2 km, od toga 6 km podmorski dio);
- Cjevovoda dugačkog 759 km (dužine 610 km u RH), kojim su spojene rafinerije nafte u Hrvatskoj (Sisak), u Sloveniji (Lendava), u BiH (Bosanski Brod), Srbiji i Crnoj Gori (Novi Sad i Pančevo), te preko mađarskog naftovodnog sustava i “Družbe”, rafinerije u Mađarskoj, Slovačkoj i Češkoj.

Dionice cjevovodnog sustava:

- dionica Omišalj (s Pumpnom stanicom Melnice) – Sisak (s odušnom stanicom Dobra),
- dionica Sisak – Virje – Gola (hrvatsko – mađarska granica),
- dionica Virje – Lendava,
- dionica Sisak – Slavonski Brod,
- dionica Slavonski Brod – Sotin (Dunav) – Novi Sad,
- dionica Slavonski Brod – Bosanski Brod
- dionica Omišalj – Urinj

2.2 TERMINAL I LUKA OMIŠALJ

Luka Omišalj, smještena na sjevernoj strani otoka Krka u zaljevu Omišlja, idealna je za prihvata i otpremu nafte, a svojim je položajem zaštićena od naleta jakog vjetrova i utjecaja valova. Dva tankerska veza s dubinom mora od $l = 30$ metara mogu bez ograničenja prihvatiti i najveće tankere. Pomoću peljara i tegljača čitava operacija okretanja i vezivanja čak i VLCC tankera ne traje duže od 3 sata. [2]

Na svakom vezu su četiri istakčke ruke za sirovu naftu i dvije za naftne derivate s mogućnošću prekrcaja od $5.000 \text{ m}^3/\text{h}$ svaka, odnosno $20.000 \text{ m}^3/\text{h}$ nafte po vezu. Tankeri mogu ukrcavati i iskrcavati naftu 24 sata na dan, 365 dana godišnje.

Za skladištenje nafte na Terminalu Omišalj koriste se:

- četiri spremnika nominalnog kapaciteta 40.000 m^3
- pet spremnika nominalnog kapaciteta 72.000 m^3
- tri spremnika nominalnog kapaciteta 80.000 m^3

Ukupni kapacitet $V=760.000 \text{ m}^3$

Na Terminalu Omišalj također se nalaze i spremnici za derivate, a neposredno uz spremnike nalazi se i autopunilište za naftne derivate.

Za skladištenje naftnih derivata na Terminalu Omišalj koriste se:

- četiri spremnika nominalnog kapaciteta 10.000 m^3
- jedan spremnik nominalnog kapaciteta 15.000 m^3
- jedan spremnik nominalnog kapaciteta 5.000 m^3

Ukupni kapacitet $V= 60.000 \text{ m}^3$

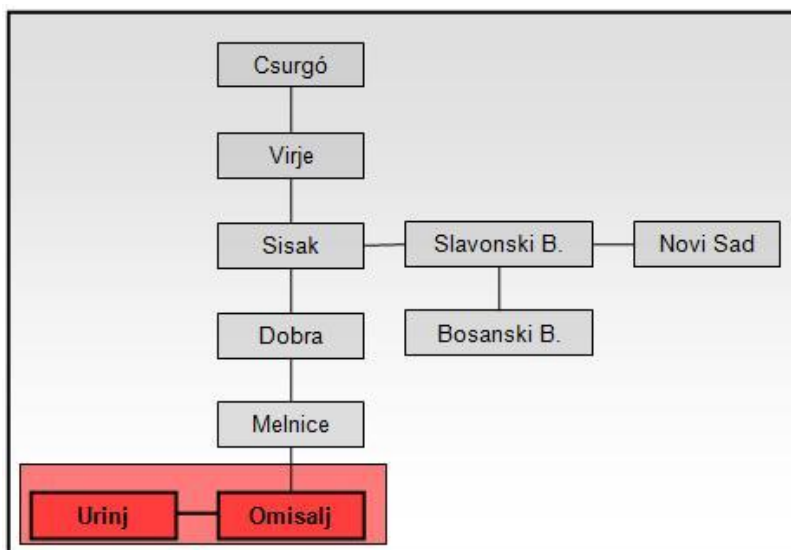


Slika 2. Luka i spremnici na Omišlju

Spremnici locirani na Omišlju su raspoređeni na dvije razine. Prva razina sa 6 spremnika je na nadmorskoj visini od 10.9 m. Na nadmorskoj visini od 19.8 m je locirana druga razina od preostalih 6 spremnika.

2.3 KOMPONENTE DIONICE OMIŠALJ – URINJ

Urinj je smješten na Jadranskom moru, približno 7 km sjeverno od luke Omišalj. 20"-cjevovod koji povezuje dvije lokacije prolazi svojim većim dijelom kroz Jadransko more. [3,1]



Slika 3. Dionica naftovoda Omišalj – Urinj

Naftovod koji povezuje Omišalj s Urinjom može funkcionirati dvosmjerno, odnosno prijenos sirove nafte može se odvijati u oba smjera, od Omišlja do Urinja i obratno. Za sad je u funkciji i koristi se samo prijenos nafte za rafineriju na Urinju.

Da bi simulacije transfera nafte od Omišlja do Urinja, koje će se promatrati u ovom radu, bila točne moraju se poznavati karakteristike sustava, odnosno njene komponente.

2.3.1 SPREMNICI

Tablica 1. Dozvoljene visina tekućine u spremnicima

Location	Level	Tank-No.	Max. Tank Bottom Height [m]	Min. Level in Tank [m]	Max. Level in Tank [m]	Min. Total Height [m]	Max. Total Height [m]
Omišalj	Om 1	A-1502 A-1504 A-1506 A-1508 A-1510 A-1512	10.9	1.35	17	12.25	27.9
	Om 2	A-1501 A-1503 A-1505 A-1507 A-1509 A-1511	18.9	1.35	17	20.25	35.9
Urinj	Ur 1	A-16 A-17	9.4	1.35	14.6	10.8	24.0
	Ur 2	A-18 A-19 A-20	15.5	1.35	17.1	16.9	32.6
	Ur 3	A-13 A-14 A-15	47.8	1.35	14.6	49.2	62.4
	Ur 4	A-21 A-22 A-23	81.0	1.35	17.1	82.4	98.1

Spremnici na terminalu Omišalj

Kao što je već navedeno Terminal Omišalj je opremljen sa 12 spremnika koji su raspoređeni na dvije razine. Prva razina spremnika na 10.9 m nadmorske visine označena je sa 'Om1', a druga razina spremnika na 18.9 m označena je sa 'Om2'. Zbog toga ovisno o razini tekućine u spremnicima može se osigurati različit usisni tlak na pumpama na Omišlju.

Item	Value	Units	Description
NAME	OM1		Unique device name
FROM	ON_UP4		Connected node
TO			Connected node (optional)
HEIGHT	<input type="text" value="18.00"/>	M	Maximum fluid level
EFROM	<input checked="" type="checkbox"/>	M	Elevation of upstream (or only) connection
FLUID			Initial fluid
HIHI	<input type="text" value="21000.00"/>	M3	Total volume
HI	<input type="text" value="20500.00"/>	M3	Nominal full volume
LO	<input checked="" type="checkbox"/> 0.00	M3	Nominal empty volume
LOLO	<input checked="" type="checkbox"/> 0.00	M3	Minimum accessible volume
TEMP	<input checked="" type="checkbox"/> 20.00	DC	Temperature
INIT_VOL	<input type="text" value="20000.00"/>	M3	Initial volume
VCURVE	Linear (built-in)		Curve of volume vs. level
SPILOVER	No		Tank can overflow?
ROOF	<input type="text" value="0.01"/>	BAR	Roof pressure
CVIN	<input checked="" type="checkbox"/> 3800.00	GAL/MIN-PSI.5	Inlet valve coefficient
CVOUT	<input checked="" type="checkbox"/> 5200.00	GAL/MIN-PSI.5	Outlet valve coefficient

Slika 4. Karakteristike Spremnika 'Om1' korištene u SPS-u

Za skladištenje nafte na terminalu Omišalj koristi se 12 spremnika različitog kapaciteta, a temperatura nafte u spremniku iznosi 20°C. Razina nafte u spremniku je 8.5 m.

Tablica 2. Kapaciteti spremnika na terminalu Omišalj

	SPREMNICI	Kapacitet
	4	40 000
	5	72 000
	3	80 000
Ukupno	12	760 000

Spremnici na Urinju

Odredište nafte, rafinerija na Urinju, opremljena je s ukupno 11 spremnika na četiri različite razine na visini od 9.4 m, 15.5 m, 47.8 m i 81 m od mora. Kroz simulaciju označeni su sa Ur1 do Ur4. Zbog različitih nadmorskih visina mora se paziti na narinuti tlak na pumpe jer ovisi u koji spremnik se nafta sprema.

Item	Value	Units	Description
NAME	UR1		Unique device name
FROM	UN1_2		Connected node
TO			Connected node (optional)
HEIGHT	12.19	M	Maximum fluid level
EFROM		M	Elevation of upstream (or only) connection
FLUID			Initial fluid
HIHI	6359.49	M3	Total volume
HI	6359.49	M3	Nominal full volume
LO	0.00	M3	Nominal empty volume
LOLO	0.00	M3	Minimum accessible volume
TEMP	20.00	DC	Temperature
INIT_VOL	0.00	M3	Initial volume
VCURVE	Linear (built-in)		Curve of volume vs. level
SPILLOVER	No		Tank can overflow?
ROOF	0.00	BAR	Roof pressure
CVIN	3800.00	GAL/MIN-PSI.5	Inlet valve coefficient
CVOUT	5200.00	GAL/MIN-PSI.5	Outlet valve coefficient

Slika 5. Karakteristike spremnika na Urinju korištene u SPS-u

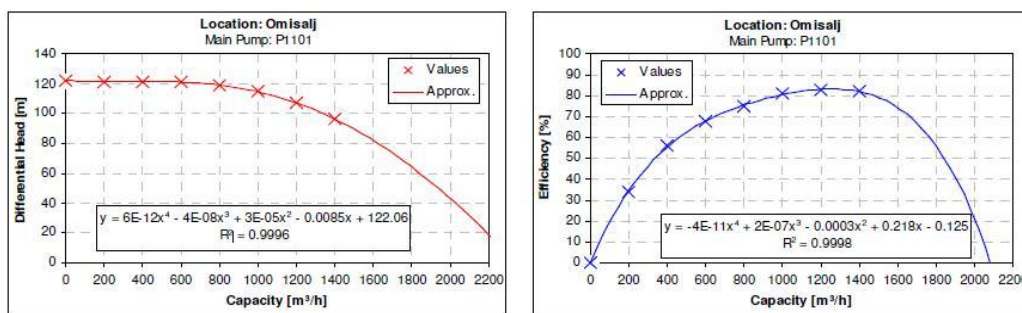
2.3.2 PUMPE

Na Omišlju se nalazi 11 pumpi. 4 booster pumpe ($P = 500$ kW) koje dopremaju naftu do glavne pumpe i 3 glavne pumpe (od 3500 kW), koje pumpaju naftu za Sisak. Za pumpanje nafte za Urinj koriste se dvije pumpe snage 380 kW. Karakteristike pumpi su dane i testirane od strane JANAF-a.

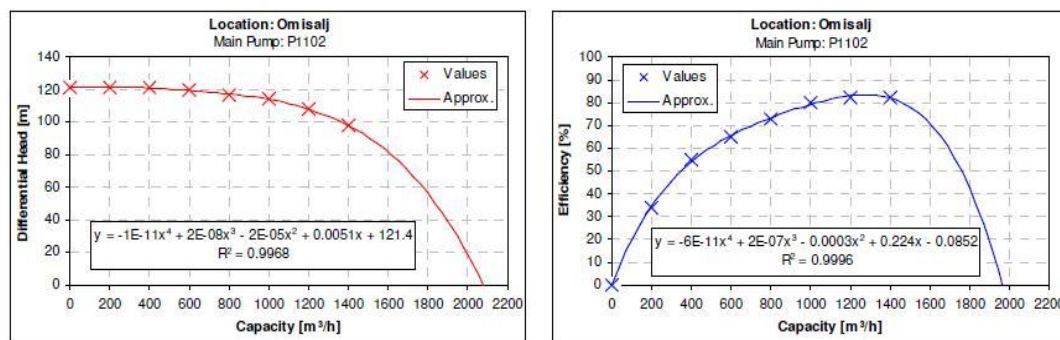
Tablica 3. Karakteristike pumpi na Omišlju

oznaka pumpe	oznaka u SPS-u	konfiguracija	brzina vrtnje (RPM)	protok (m ³ /hr)	visina dobave (m)	snaga(kW)
P1101	OUP01	paralelna	1485	1000	110	380
P1102	OUP02	paralelna	1485	1000	110	380

Grafički prikaz karakteristike pumpi:



Slika 6. Karakteristike pumpe OUP01



Slika 7. Karakteristika pumpe OUP02

Za pumpanje nafte na Urinj koristi se jedna pumpa, tako će se i u ovom radu koristiti samo jedna pumpa, koristi se pumpa OUP01, a njeni podaci korišteni u SPS-u pokazani su slikom.

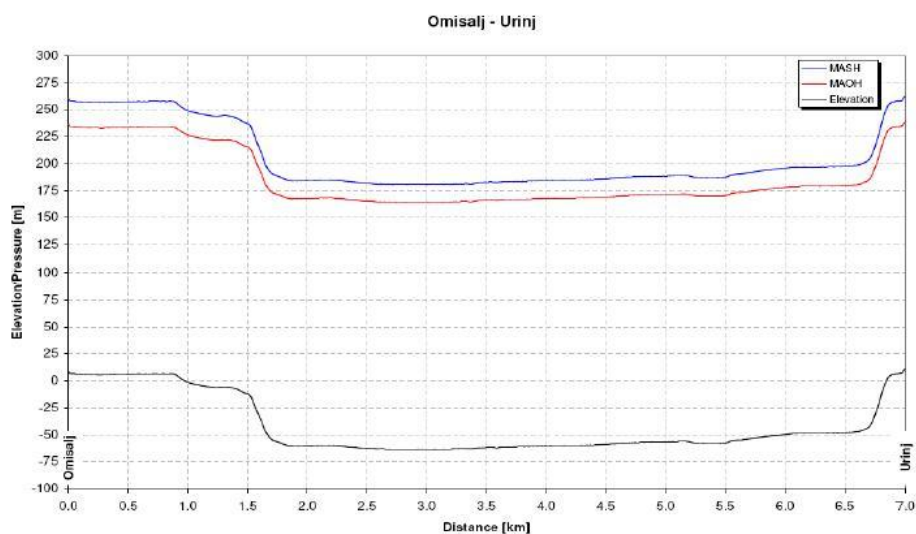
Item	Value	Units	Description
NAME	OUP01		Unique device name
FROM	ON_UP11		Upstream connection
TO	ON_UP12		Downstream connection
STARTING	No		Initial status
SPEED	<input type="checkbox"/> 1485.00	RPM	Rated pump speed
POWER	<input type="checkbox"/> 380.00	KW	Rated driver power
INERT	<input checked="" type="checkbox"/> 42.14	KG-M2	Effective moment of inertia
TORQ	<input checked="" type="checkbox"/> 160.00		Average starting torque as a percent of running torque
RPM-BP	<input type="checkbox"/> 1485.00	RPM	Pump speed at best efficiency point
HP-BP	<input type="checkbox"/> 359.00	KW	Pump brake horsepower based on water at BEP
HD-BP	<input type="checkbox"/> 107.00	M	Pump differential head at BEP
Q-BP	<input type="checkbox"/> 1230.00	AM3/HR	Pump flow rate at BEP
TQ+BP	<input checked="" type="checkbox"/>	N-M	Pump torque at BEP flow and 0 speed
TQ-BP	<input checked="" type="checkbox"/>	N-M	Pump torque at BEP reverse flow and 0 speed
DH+BP	<input checked="" type="checkbox"/>	M	Differential head at BEP flow and 0 speed
DH-BP	<input checked="" type="checkbox"/>	M	Differential head at BEP reverse flow and 0 speed
STG	<input checked="" type="checkbox"/>		Number of stages
SFR	<input checked="" type="checkbox"/> 0.00		Stopping friction, percent of rated torque
H-CURVE	Select Curve		Head vs flow curves
Power relation	EFFICIENCY		Using power or efficiency curves
E-CURVE	Select Curve		Efficiency vs flow curves

Slika 8. Podaci za pumpu korišteni u simulacijskom programu *Stoner Pipeline Simulator* (SPS)

2.3.3 CJEVOVOD

Naftovod od Omišlja do Urinja dug je 7 km, početne visine od 8.9 m, te maksimalne elevacije 10.73 m, te promjera cjevi 20". Unutarnja hrapavost cjevi je 0.1 mm. Cjevi su čelične sa maksimalnom vlačnom čvrstoćom od $\sigma = 455 \text{ N/mm}^2$.

Maksimalno dopušteni tlak (**MAOP**¹) u cjevi je $p = 19 \text{ bar}$.



Slika 9. Visina cjevovoda i MAOP (ovisnost visine i tlaka s obzirom na udaljenost)

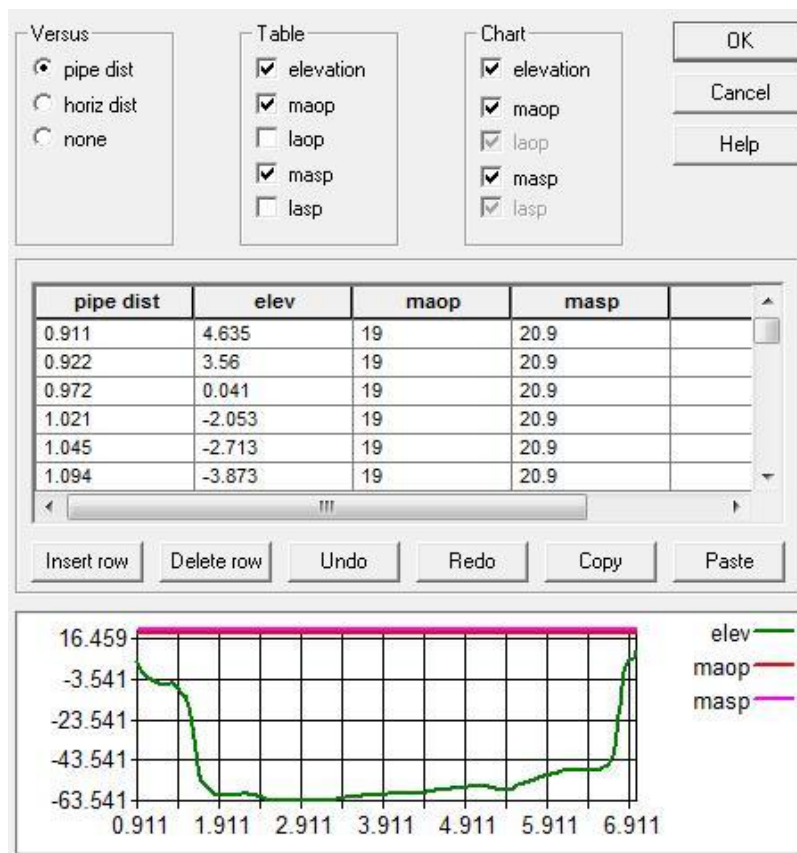
U programu *Stoner Pipeline Simulator* uneseni i korišteni su sljedeći podaci za cjevovod (primjer jednog dijela cjevovoda).

Item	Value	Units	Description
NAME	PIP40_2		Unique device name
FROM	NOD40_2		Upstream connection
TO	NOD40_4		Downstream connection
LEN	6.08	KM	Pipe length
OD	508.00	MM	Outside diameter
WT	12.70	MM	Wall thickness
T-	15.00	DC	Initial fluid temperature at upstream end
T+	15.00	DC	Initial fluid temperature at downstream end
FRICTION	COLE		Friction loss method
RUF	0.1	MM	Colebrook or Nikuradse roughness
AMP	1.00		Area multiplier (number of identical parallel lines)
MODULUS	199.95	GPA	Young's Modulus
TABLE	Edit ...		Pipe elevation and/or MAOP/LAOP/MASP/LASP table

Slika 10. Podaci o cjevovodu (primjer PIP40_2)

¹ maximum allowable operating pressure

Moraju se unijeti i podaci elevacije cjevovoda.



Slika 11. Zadavanje elevacije cjevovoda

2.3.4 FLUID (NAFTA)

Nafta, kao fluid koji protječe cjevovodom, jedan je od glavnih komponenti sustava. Standardne karakteristike nafte su:

- Temperatura: $T = 15^{\circ}\text{C}$
- Tlak: $p = 101.325 \text{ kPa}$
- Gustoća: $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$

Nafta, kao vrsta fosilnog goriva, je tamna i viskozna tekućina koja se obično pronalazi ispod površine Zemlje ili morskog dna. To je vrlo složena smjesa različitih spojeva, pretežito ugljikovodika alkanskog, cikloalkanskog i aromatskog reda čiji se sastav mijenja od nalazišta do nalazišta. [4,5]

Nafta se najviše koristi za pokretanje vozila (obično u obliku benzina i drugih derivata) te za dobivanje električne energije u termoelektranama. Također je značajna sirovina za mnoge proizvode (plastika, umjetno gorivo, razni razrjeđivači i ostale kemikalije).

Sastav






Po svom kemijskom sastavu nafta je mješavina velikog broja različitih ugljikovodika i malih količina spojeva sumpora, kisika i dušika (u tragova i do 7%). U njoj su zastupljeni ugljikovodici s jednom do 50 i više C - atoma u molekuli, i to pretežito parafinskog (metanova) niza (npr. pensilvanska nafta) ili naftenskog niza (npr. neke sovjetske nafte).

Manje su zastupljeni aromatski ugljikovodici (npr. neke rumunjske nafte). U nafti su, bez obzira na vrstu ugljikovodika, zastupljeni više ili manje, svi članovi pojedinog niza: od lakohlapljivih do teškohlapljivih te krutih s velikim brojem C - atoma. O većoj ili manjoj zastupljenosti nižih odnosno viših članova ovisi gustoća nafte. Lagane nafte kod prerađivanja daju više laganijih frakcija, ili ih uopće ne daju.

Najveći proizvođači nafte

Nafta je danas u svijetu jedan od najznačajnijih strateških proizvoda (obično se naziva "crno zlato"). Zbog toga zemlje proizvođači nafte imaju veliku moć u geopolitičkim odnosima, a kontrola nad izvoristima nafte jedan od najznačajnijih uzroka kriza u svijetu. Zemlje koje su najveći izvoznici nafte (ali ne uvijek i proizvođači) su grupirane u organizaciju **OPEC-a**².

Najveći proizvođači nafte su:

1.  Saudijska Arabija (10,37 milijuna barela)
2.  Rusija (9,27 milijuna barela)
3.  Sjedinjene Američke Države (8,69 milijuna barela))
4.  Iran (4,09 milijuna barela)
5.  Meksiko (3,83 milijuna barela)

Tablica 4. Zalihe nafte u svijetu

	Države	Zalihe (milijuni barela)
1.	Saudijska Arabija	264,2
2.	Ujedinjeni Arapski Emirati	97,8
3.	Iran	89,7
4.	Rusija	48,6
5.	Libija	29,5
6.	Kina	24
7.	Sjedinjene Američke Države	22,4
8.	Katar	15,2
9.	Norveška	9,4
10.	Alžir	9,2
11.	Brazil	8,4
12.	Oman	5,5
13.	Angola	5,4
14.	Indija	5,4
15.	Kazahstan	5,4

² Organization of Petroleum Exporting Countries

Tablica 5. Potrošnja nafte u svijetu

	Država	Potrošnja (milijuna barela dnevno)
1.	Sjedinjene Američke Države	19,7
2.	Japan	5,4
3.	Kina	4,9
4.	Njemačka	2,71
5.	Brazil	2,38
6.	Rusija	2,2
7.	Kanada	2
8.	Indija	2
9.	Francuska	1,96
10.	Meksiko	1,93
11.	Italija	1,87
12.	Velika Britanija	1,7
13.	Španjolska	1,5
14.	Saudijska Arabija	1,36
15.	Indonezija	1,02

3. SIMULACIJA SUSTAVA JANAF-a

Dionica od Omišlja do Urinja simulirati će se u više različitih slučajeva kako bi se bolje prikazalo stanje u cjevovodu i različite karakteristike te izlazni podaci s obzirom na zadane slučajeve. Podrazumjevaju se slučajevi pokretanja, prekida, kratkotrajnih opterećenja sustava u kojima može doći do povećanja tlaka iznad maksimalno dopuštenog, a samim time i do pucanja cjevi itd. Simulacijski program *Stoner Pipeline Simulator* bi mogao ukazati na prethodno navedene slučajeve opterećenja sustava. [1,7]

Shematski model dionice od Omišlja do Urinja prikazan je u Prilogu 1.

3.1 SIMULACIJSKI PROGRAM *STONER PIPELINE SIMULATOR* (SPS)

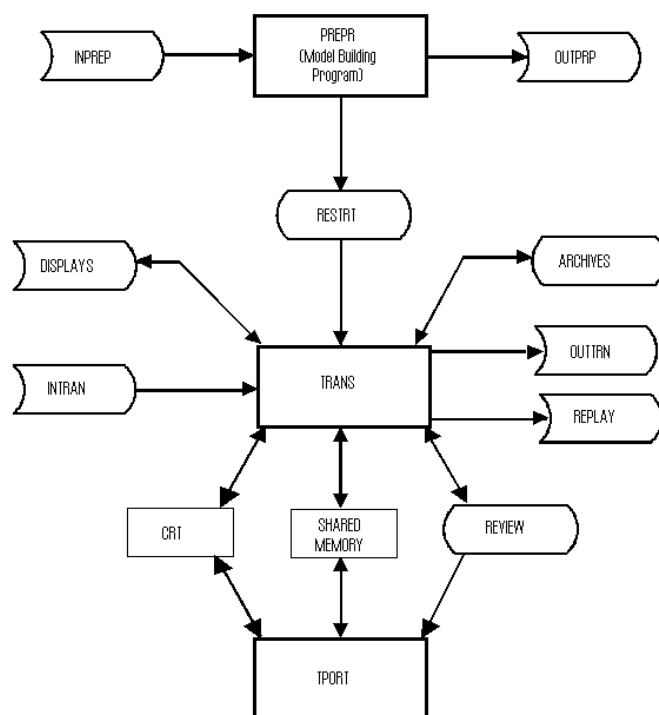
Stoner Pipeline Simulator je softverski paket sposoban za točnu analizu i predviđanje hidrauličke izvedbe plinovoda, vodovoda i naftovoda. Može simulirati bilo koju konfiguraciju cjevi i opreme bez obzira na zahtjeve sustava, čak i puknuće cjevi ili prestanak rada pumpe, pokvarenog ventila itd. [6]

Analiza određenog sustava počinje od postavljanja istoga. Moraju se odrediti globalne karakteristike sustava. Tako se moraju zadati parametri, kao što su mjerne jedinice, tekućina (u ovom slučaju nafta), temperatura u cjevi, temperatura nafte, itd.

Nakon što se odredi sustav naftovoda napravi se model sustava u Model Builder-u u koji se upisuju podaci vezani za cjevovod, pumpe, ventile, spremnike. U ovom radu to je model sustava Jadranskog naftovoda od Omišlja do Urinja sa zadanim podacima (Prilog 1).

Nakon što je napravljen model sustava napiše se logika izvođenja (Prilog 3), tj. odrede se sekvence otvaranja, zatvaranja ventila, pokretanja i isključivanja pumpi, itd.

Pošto je pokrenut sustav SPS pokazuje se tražena simulacija.



Slika 12. Način rada SPS-a

Sustav konfiguriranja cjevovoda (*Model Builder*)

Za dionicu Jadranskog naftovoda od Omišlja do Urinja potrebno je nekoliko komponenata sustava. Simbolima korištenim u Model Builderu pokazat će se glavne komponente.

Tim koponentama je i shemtski prikazan model dionice od Omišlja do Urinja kao u prilogu 1.



- zaporni ventil (block valve)



- spremnik (atmospheric tank)



- pumpa (pump)



- cjevovod (transfer line)



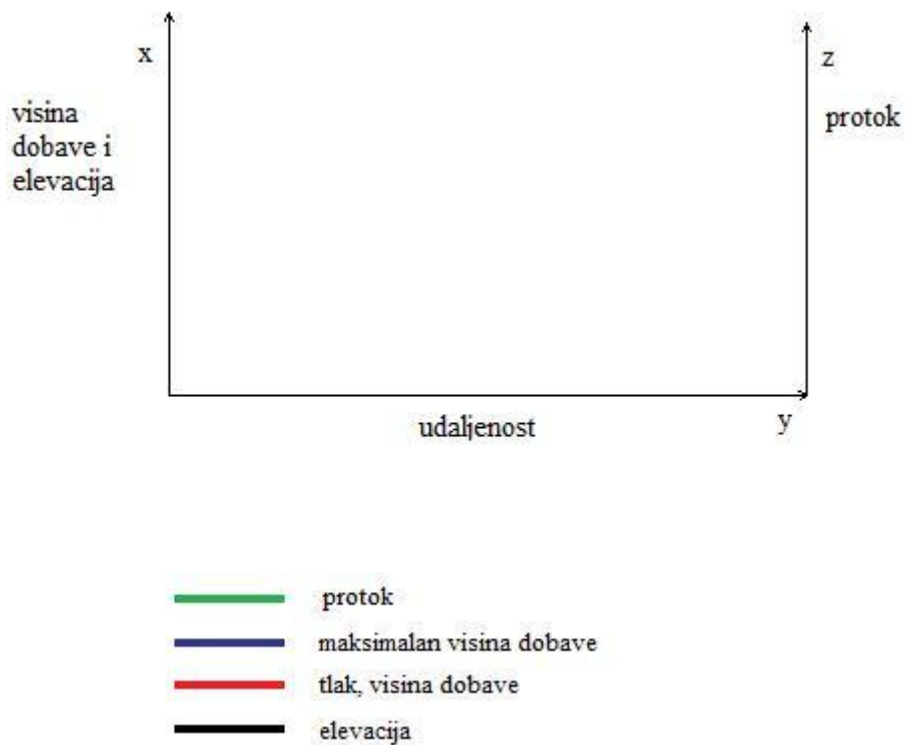
- sigurnosni ventil (check valve)



- cijev (header)

Dijagrami

Grafovi i dijagrami prikazani u slikama koje sljede prikazuje se ovisnost visine dobave i protoka o udaljenosti kao što pokazuje sljedeća slika.



Slika 13. Shema dijagrama

Zelenom bojom će se prikazati protok (q_v) u m^3/h , plavom maksimalna visina dobave pumpe, crvenom tlak odnosno visina dobave, a crnom nadmorska visina s obzirom na udaljenost.

3.2 POKRETANJE SUSTAVA

Hidraulički uvjeti i ostvarivi protok nafte kod transportiranja nafte od Omišlja do Urinja ovise o lokaciji spremnika koji dobivaju naftu (na Urinju) i lokaciji spremnika na Omišlju.

Dvije pumpe koje se koriste za prijenos nafte za Urinj su postavljene paralelno. Prijenos nafte se provodi sa samo jednom pumpom koja radi, a druga se drži u pripravnosti za svaki slučaj ako jedna pumpa prestane raditi (1+1 konfiguracija)

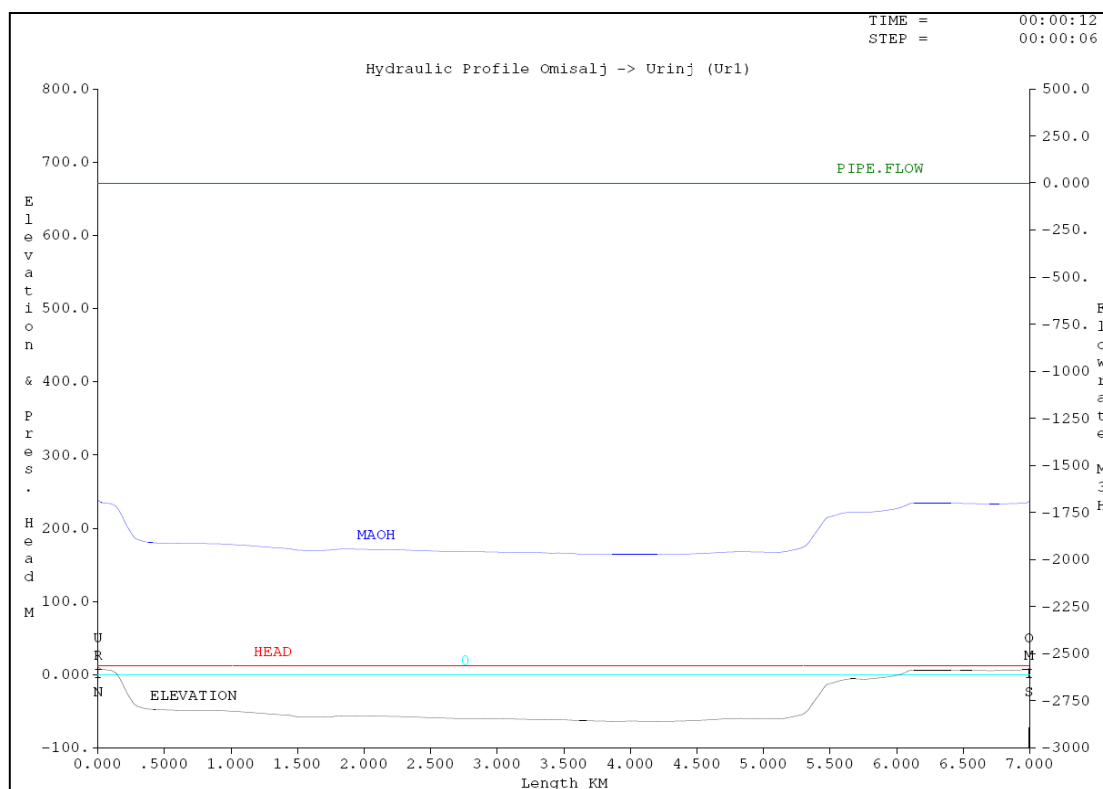
Transfer nafte od Om2 (viša razina) do Ur1 (niža razina)

Ovaj slučaj proučava isporuku nafte u spremnik na Urinju koji je nisko ispunjen naftom Ur1 (razina tekućine je 1.35 m). Spremnik iz kojeg se nafta uzima je Om2 koji je dupkom ispunjen (razina tekućine je 17 m).

Ovakva konfiguracija trebala bi prouzročiti maksimalni mogući protok za prijenos nafte jer se može postići maksimalni mogući usisni tlak, a tlak na Urinju je najmanji mogući.

Početno stanje prije nego pumpa počne djelovati je prikazana na slici 14. u kojoj zelena linija predstavlja protok (m^3/h), plava linija predstavlja stupac maksimalne visine dobave pumpe (**MAOH**³). Crvena linija predstavlja tlak u cjevovodu odnosno visinu dobave pumpe, a crna predstavlja visinu tla odnosno elevaciju, dok zelena linija predstavlja 0 nadmorske visine. Tlak u cjevovodu je ovisan i o tlakovima u spremnicima, a iznose 0.3 bar na Omišlju i 0.12 bar na Urinju.

³ Maximum allowable operating head



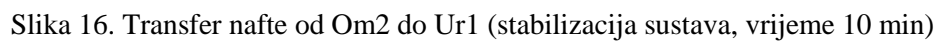
Slika 14. Transfer od Om2 do Ur1 (nakon 12 sekundi).

U trenutku simulacije $t = 0$ ventil spremnika Om2 je otvoren. U istom vremenu od 0 sekundi usisni ventil za prvu pumpu je otvoren. Otvoreni položaj regulacijskog ventila s tlačne strane pumpe je postavlje na 0%, odnosno zatvoren.

S vremenom se pokreće prva pumpa na Omišlju usprkos tome što je izlazni ventil zatvoren. Čim pumpa dostigne puni broj okretaja, odnosno brzinu vrtnje izlazni ventil se otvara. Ventil se polako otvara u periodu od 3min dok ne postane potpuno otvoren (**100%**)⁴. Nafta ulazi u cjevovod i cjevovod je pod tlakom.

Sljedeća slika prikazuje povećanje protoka i tlaka nekoliko sekundi nakon pokretanja pumpe i otvaranja izlaznog ventila. Tlak u cjevovodu odnosno visina dobave pumpe se postupno povećava dok se potpuno ne stabilizira što se vidi na slici 16. Izlazni tlak na Omišlju iznosi 5.8 bar, a usisni tlak na Urinju 0.3 bar.

⁴ Ventil se u stvarnom transportu nafte otvori do maksimalno 60%



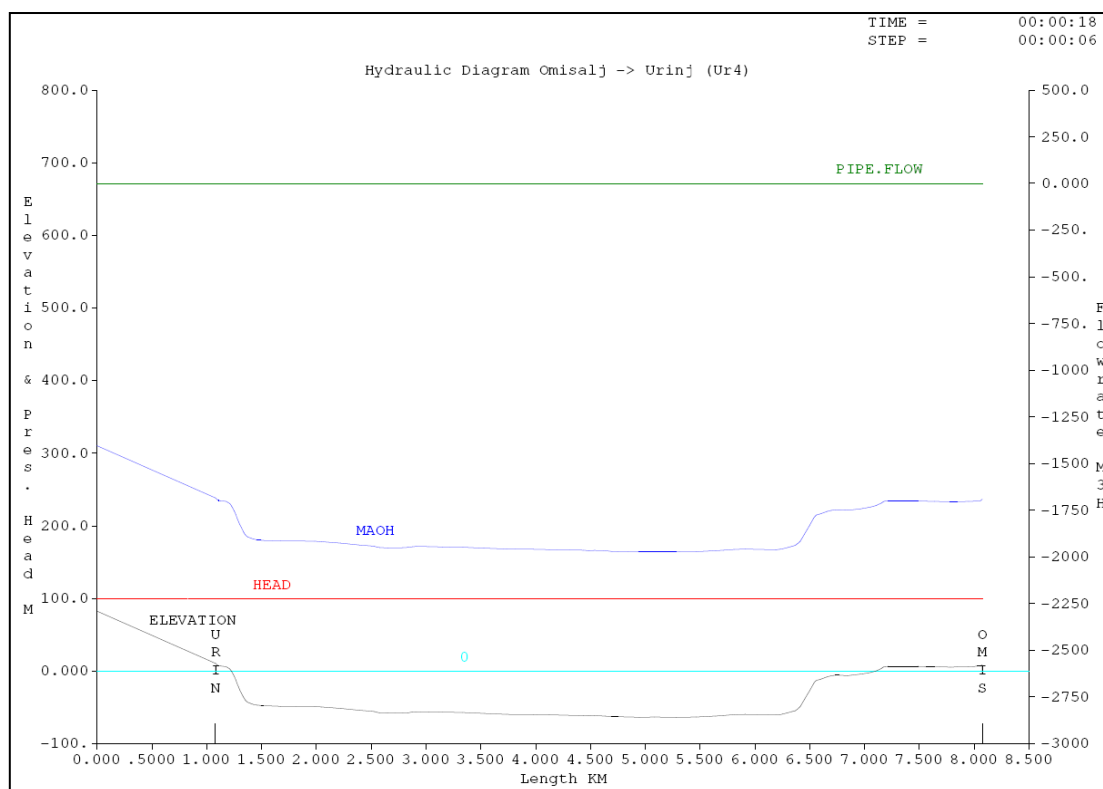
Odgovarajući protok nakon postizanja stabilnog stanja je $1337 \text{ m}^3/\text{h}$. Pumpa u radu ima usisni tlak od 1.7 bar a izlazni tlak od 9.2 bar. Pumpa daje visinu dobave od 89 m. Može se zaključiti da je maksimalno ostvariv protok pod danim uvjetima $1337 \text{ m}^3/\text{h}$.

Treba napomenuti da je ovaj maksimalno moguć protok ostvariv uz minimalne gubitke tlaka na ventilima.

Transfer nafte od Om1 (niža razina) do Ur4 (viša razina)

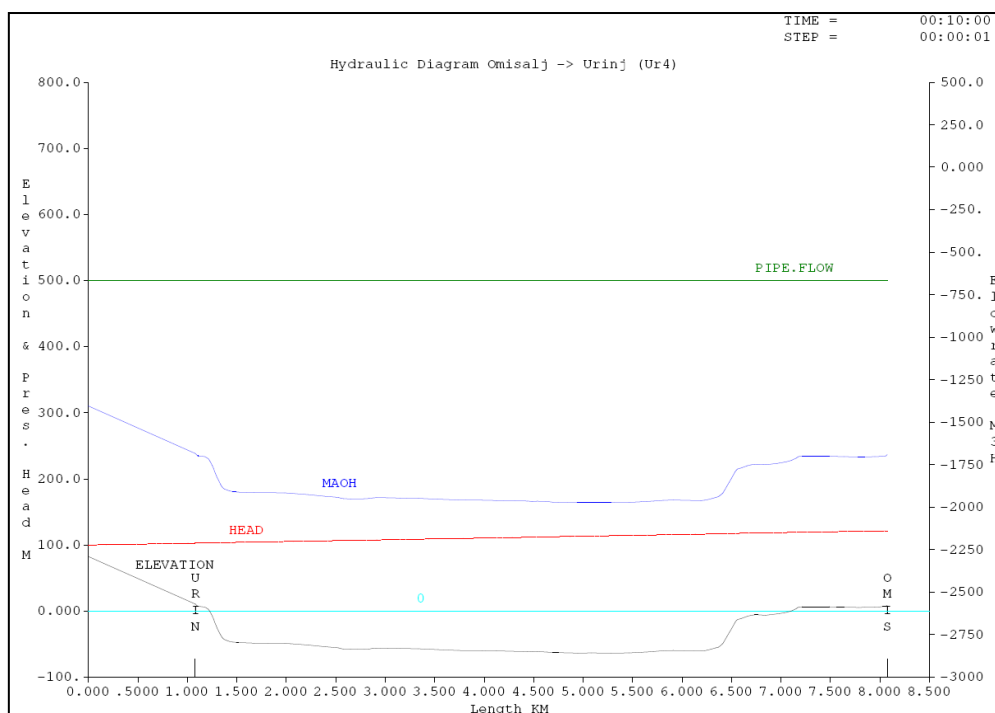
Sljedeći slučaj koji se analizira promatra isporuku sirove nafte u pun spremnik na višoj nadmorskoj visini na Urinju od 17.1 m. Spremnik iz kojeg se nafta uzima je smješten na najnižoj nadmorskoj visini od 1.35 m. Ovaj slučaj bi trebala dati maksimalno ostvariv protok za prijenos u najgorem slučaju, jer je usisni tlak na pumpi najmanji, a tlak na ulazu u spremnik na Urinju je najveći mogući.

Slika 17 prikazuje početno stanje prije nego pumpa na Omišlju počne s radom. Tlak na izlazu iz Omišlja je 7.6 bar, a na ulazu u spremnik na Urinju 7.4 bar. Spremnik na Urinju (Ur4) udaljen je još dodatnih 1100 m od spremnika Ur1 što se isto uzima u obzir u simulaciji.

Slika 17. Transfer nafte od Om1 do Ur4 ($t = 0$ min)

Proces pokretanja pumpe je isti kao u prvom slučaju. U simulacijskom vremenu od 7 min regulacijski ventil je otvoren i tlak u cjevi postupno počinje rasti s povećanjem protoka.

Sljedeća slika prikazuje stabilizaciju visine dobave pumpe, odnosno tlaka, na maksimalno mogućem protoku od $671 \text{ m}^3/\text{h}$. Tlak na Omišlju sada iznosi 9.4 bar, a na Urinju 7.7 bar. Snaga pumpe je 269 kW.



Slika 18. Transfer nafte od Om1 do Ur4 (stabilizacija sustava)

S obzirom na podatke i različite slučajeve pokretanja sustava i pumpe, transport nafte od Omišlja do Urinja može varirati od minimalnog protoka od $671 \text{ m}^3/\text{h}$ do maksimalnog protoka od $1337 \text{ m}^3/\text{h}$ ovisno o lokacijama spremnika i njihovoj zapunjenosti.

Sljedeća tablica pokazuje slučajeve transporta nafte od Omišlja do Urinja kada su spremnici na Omišlju i Urinju jednako (do pola) zapunjeni.

Tablica 6. Slučajevi protoka od Omišlja do Urinja

		Spremnici na Omišlju	
		Om1	Om2
		(1+1)	(1+1)
Spremnici na Urinju	Ur1	$1285 \text{ m}^3/\text{h}$	$1299 \text{ m}^3/\text{h}$
	Ur2	$1246 \text{ m}^3/\text{h}$	$1269 \text{ m}^3/\text{h}$
	Ur3	$1008 \text{ m}^3/\text{h}$	$1044 \text{ m}^3/\text{h}$
	Ur4	$814 \text{ m}^3/\text{h}$	$868 \text{ m}^3/\text{h}$

3.3 PREKID TRANSPORTA NAFTE

Kod prekida transporta nafte mora se paziti na dobar redoslijed zatvaranja ventila i pumpe.

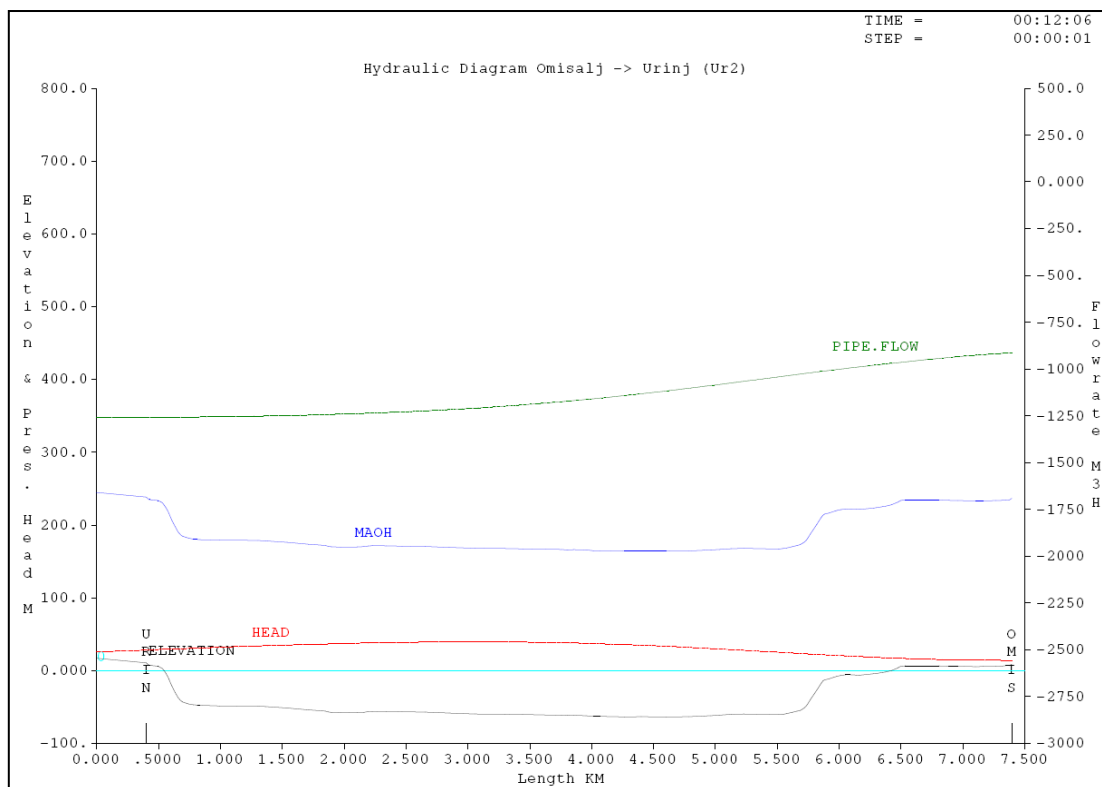
S obzirom na zadanu elevaciju, odnosno različite nadmorske visine mora se paziti na redoslijed zatvaranja. Prvo se ugasi pumpa. Pošto se pumpa ne ugasi odmah nakon što smo ju isključili nego se lagano zaustavlja te tako se polako smanjuje i tlak u cjevi, a samim time i protok.

Nakon što se pumpa ugasi zatvaraju se ventili na strain Omišlja (ventil spremnika, usisni ventil, izlazni – otpuštajući ventil.), a poslije kad nema više protoka u cjevovodu zatvore se preostali ventili na Urinju.

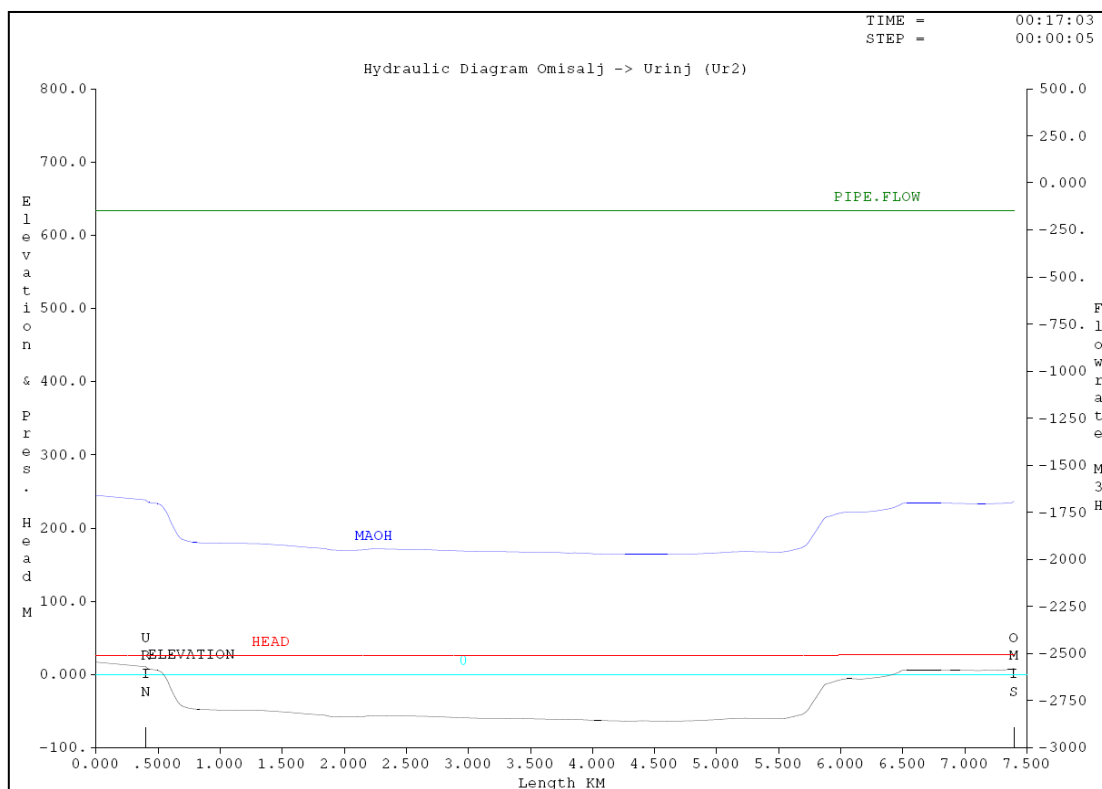
Slučaj prekida transporta nafte od Om2 do Ur2

Za primjer je prikazan slučaj prestanka rada pumpe kod transporta nafte iz spremnika Om2 do Ur2 koji su na početku do pola ispunjeni naftom. Maksimalni protok za dani slučaj je 1269 m³/h, a pumpe su spojene u konfiguraciju 1+1. U simulacijskom vremenu od $t = 12$ min pokrenut je postupak prekida transporta nafte.

Slika 19 pokazuje situaciju nekoliko sekundi nakon isključivanja pumpe. Protok i tlak se polako smanjuju. S obzirom da je spremnik na Omišlju ipak na većoj nadmorskoj visini u cjevovodu još postoji mali protok od 146 m³/h, iako je pumpa zaustavljena (Slika 20.)



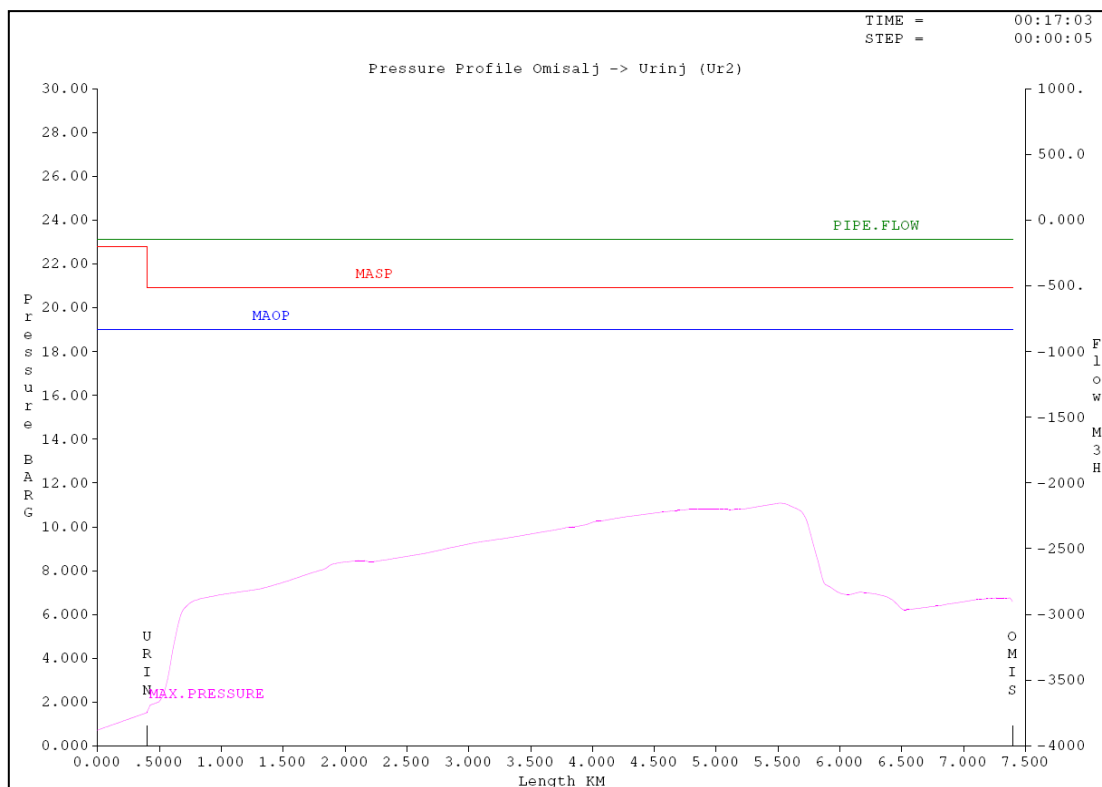
Slika 19. Transfer od Om2 do Ur2 (zaustavljanje pumpe, t = 12:06 min)



Slika 20. Transfer od Om2 do Ur2 (5 min nakon zaustavljanja pumpe)

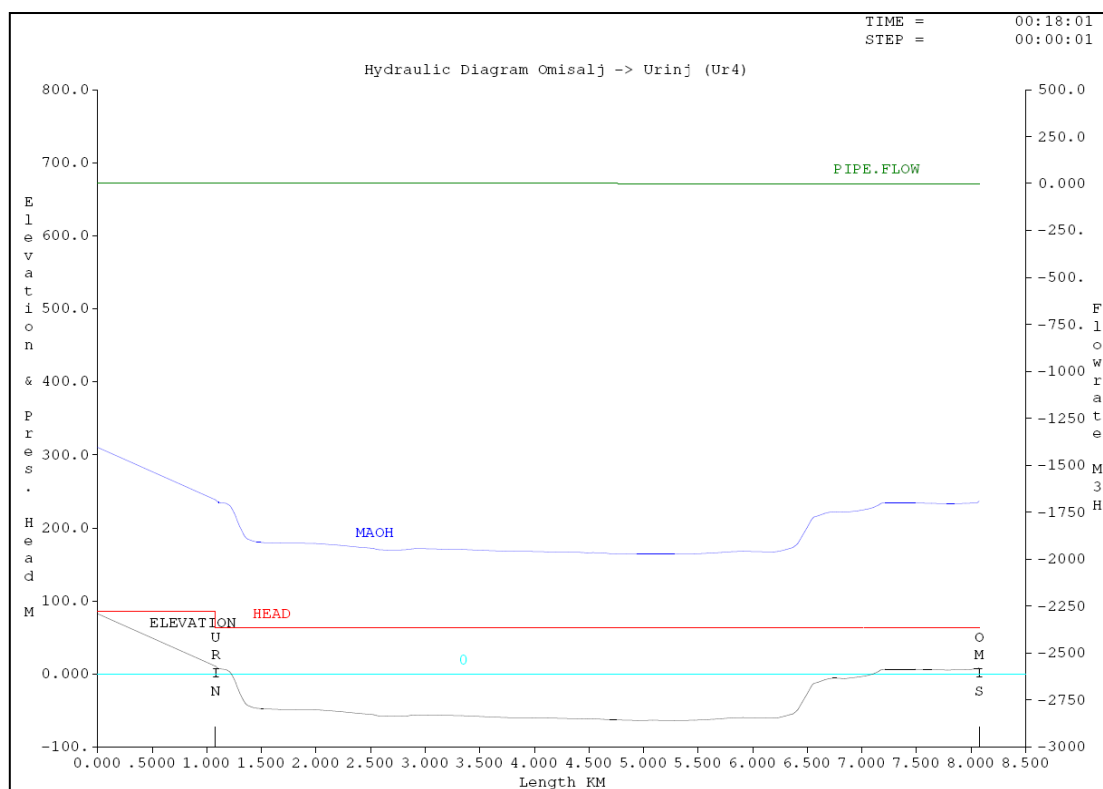
Nakon zatvaranja ventila na spremniku ili bilo kojeg drugog ventila na putu prema Urinju, protok će se smanjiti i tek onda će doći do nule.

U režimu zaustavljanja pumpe i prekida transporta nafte ne dolazi do porasta tlaka iznad maksimalno dopuštenog tlaka (MAOP) što je prikazano sljedećom slikom.



Slika 21. Transfer od Om2 do Ur2 (Maksimalni tlak u sustavu)

Budući da protok opada od Omišlja prema Urinju i pošto količina nafte koja dođe do Urinja ne može otići natrag prema Omišlju zbog sigurnosnog ventila na ulazu u Omišalj, rezultirajuće stabilno stanje može uvjetovati različite tlakove na cijevi na Urinju i na cjevovod Omišalj – Urinj (Slika 22.). Pošto će se javiti mali tlak na strani Urinja, sigurnosni ventil će se zatvoriti, ali novim pokretanjem pumpe povećat će se tlak sa ulazne strane na Urinj i pod većim pritiskom će se sigurnosni ventil otvoriti.



Slika 22. Transfer od Om2 do Ur2 (nema transporta)

3.4 SLUČAJEVI KRATKOTRAJNOG OPTEREĆENJA SUSTAVA

U sljedećim slučajevima će se pokazati situacije kratkotrajnog opterećenja sustava. Svi slučajevi opterećenja su simulacijski pokrenuti za vrijeme stabilnog hidrauličkog stanja, odnosno protoka nafte. Uzeti su u obzir početni slučajevi sa visokim stupnjem protoka jer će u tim slučajevima biti prouzročen maksimalni udarni pritisak.

Sustav zaštite za transport sirove nafte od Omišlja do Urinja se odnosi na odušni ventil smješten između ulaznog ventila na Urinju i sigurnosnog ventila na Urinju. Tako isto je postavljen sustav zaštite sa strane Omišlja.

Karakteristike odušnog ventila su 9 bar na Urinju i 15.5 bar na Omišlju, što je 2 bar više od maksimalnog ulaznog tlaka na Urinju i Omišlju.

Nestanak struje na pumpnoj stanici Omišalj

Nedostatak struje na pumpnoj stanici Omišalj je prouzrokovana kvarom napajanja električnog dobavljača energije. To može prouzrokovati neplaniran prekid rada pumpe.

Ovakav slučaj kratkotrajnog opterećenja sustava je jednak kao planiranom gašenju pumpe kao što je prikazano u poglavlju 3.3 s razlikom što ventili spremnika i izlazni ventili pupmi nisu zatvoreni. Nestanak struje i kasnije gašenje pumpe vodi do smanjenja protoka i laganog opadanja pritiska u cjevi kao što je i prikazano slikom 19. Ako je statički tlak spremnika na Omišlju veći od statičkog tlaka spremnika na Urinju, mala količina sirove nafte će se ipak transportirati pod utjecajem gravitacijskog protoka.

Za slučaj transporta nafte od dupkom zapunjenog spremnika Om2 do spremnika Ur1 na Urinju može se postići maksimalni protok uzrokovan gravitacijom, odnosno statičkim tlakom. Simulacijom je pokazano da protok sirove nafte može doseći i 616 m³/h. Nakon toga bi se oprezno zatvarali ventili što bi nakraju prouzročilo prestanak transporta nafte.

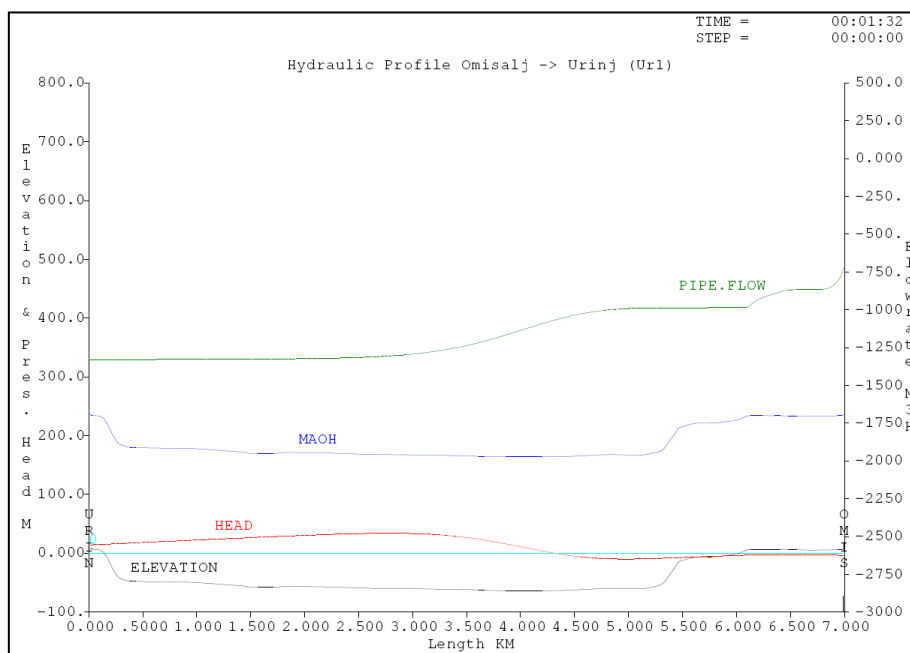
Zatvaranje izlaznog (ispusnog) ventila na Omišlju

Neplanirano zatvaranje ispusnog ventila na Omišlju će rezultirati povećanjem tlaka uzvodno od mjesta poremećaja. Najveće povećanje tlaka se postiže u slučaju s najvećim protokom (1337 m³/h), kad se nafta transportira iz spremnika Om2 (potpuno zapunjen) do Ur2 (prazan). Maksimalno dopušteni tlak u cjevovodima na Omišlju je 22.8 bar.

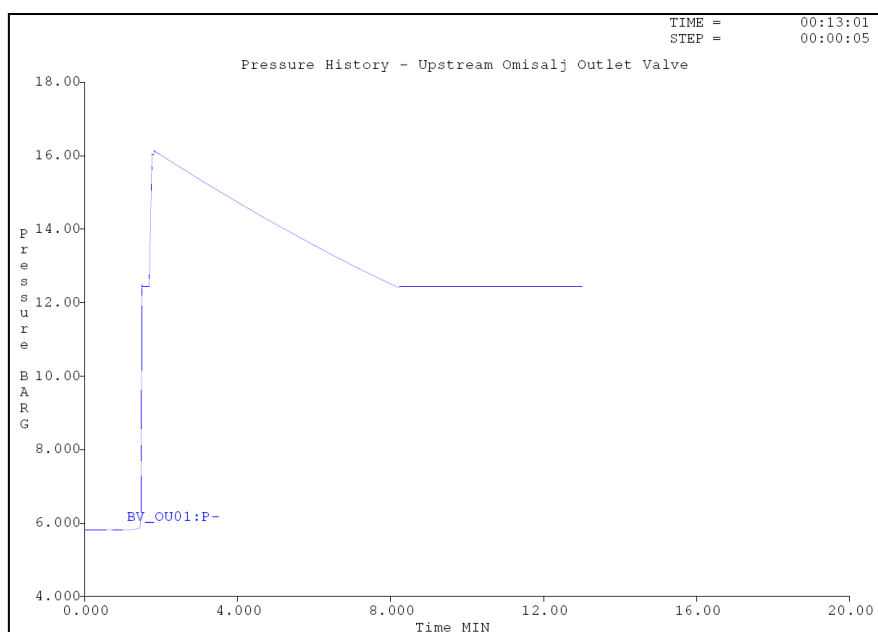
Zatvaranje ispusnog ventila je prouzročeno u vremenu od $t = 0$ min. Slika 23 pokazuje hidraulički učinak točno nakon potpunog zatvaranja ventila u vremenu od $t = 1:32$ min. Tlak

nizvodno od ventila postupno se smanjuje, a s tlakom isto tako smanjuje se i protok koji ulazi u naftovod za Urinj.

Sa strane uzvodno od ventila dolazi do povećanja tlaka. Odmah nakon zatvaranja ventila $t=1:30$ min tlak se povećava do približno 16 bar, nakon čega se postupno stabilizira na približno 12.5 bar što je vidljivo na slici 24.



Slika 23. Transfer od Om2 (pun) do Ur2 (prazan, zatvaranje ventila, vrijeme $t = 1:32$ min)



Slika 24. Transfer od Om2 do Ur2 (tlak na ventilu na Omišlju)

Zatvaranje ulaznog (usisnog) ventila na Urinju

Stanica na Urinju spojena je na 20" cjevovod i na motor preko ulaznog ventila. Vrijeme zatvaranja postavljeno je u Stoner Pipeline Simulatoru na iznos od 1:30 min.

Zatvaranje ventila prouzrokuje povećanjem tlaka uzvodno od ventila koji ne smije biti veći od 19 bar.

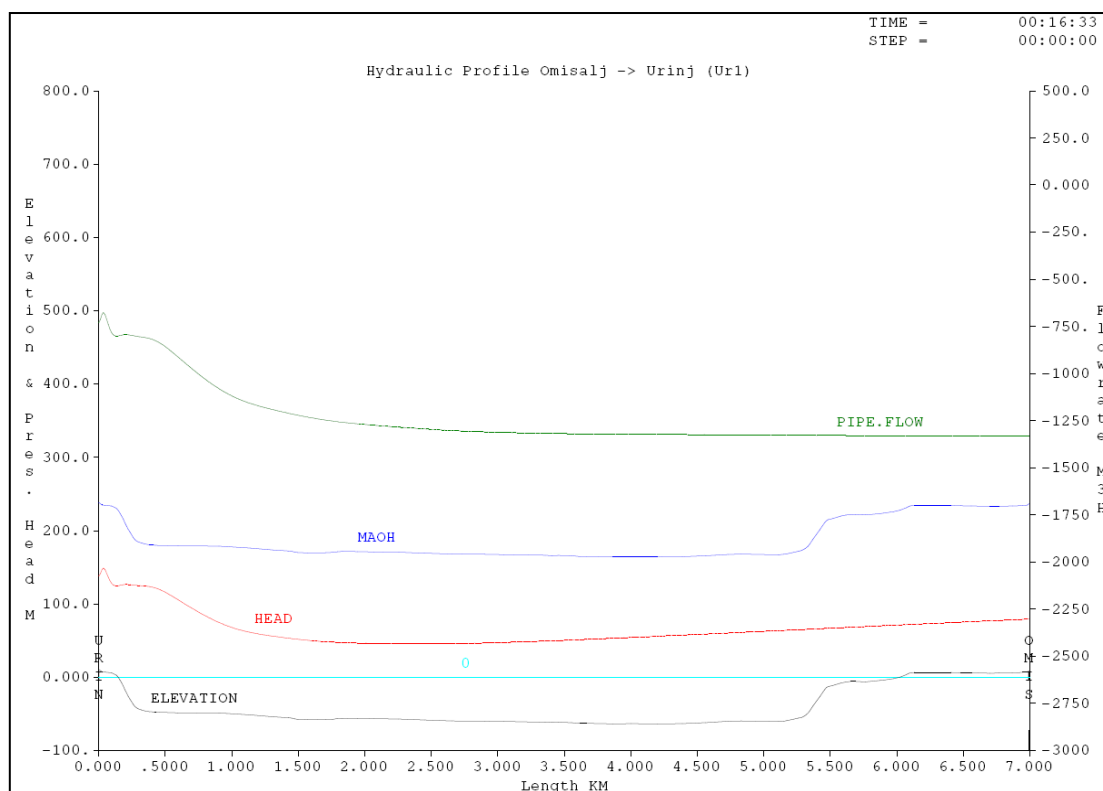
Najveći protok se može očekivati kod transporta nafte prema spremniku Ur1, a u tom slučaju je ulazni tlak na Urinju mali i postoji velika razlika između ulaznog tlaka i usisnog tlaka (**MASP**⁵). Bez obzira, velika količina protoka prouzrokuje visok tlak u sustavu.

U slučaju kad se transportira nafta do spremnika Ur4 koji je na višoj nadmorskoj razini, manji je potreban ulazni tlak. U tom slučaju granica prema MASP postaje manja.

Dominantna karakteristika za veličinu tlaka kod transporta nafte je protok. Što je veći protok to se veći tlačni val vraća u sustav. Tlak se povećava uzvodno od zatvorenog ventila na kojem se nalazi odušni ventil koji je namješten na 9 bar.

Hidraulički efekt prikazan u simulaciji se odnosi na transport nafte od Om2 do Ur1 pri protoku od 1337 m³/h, gdje su pumpe spojene u konfiguraciju 1+1.

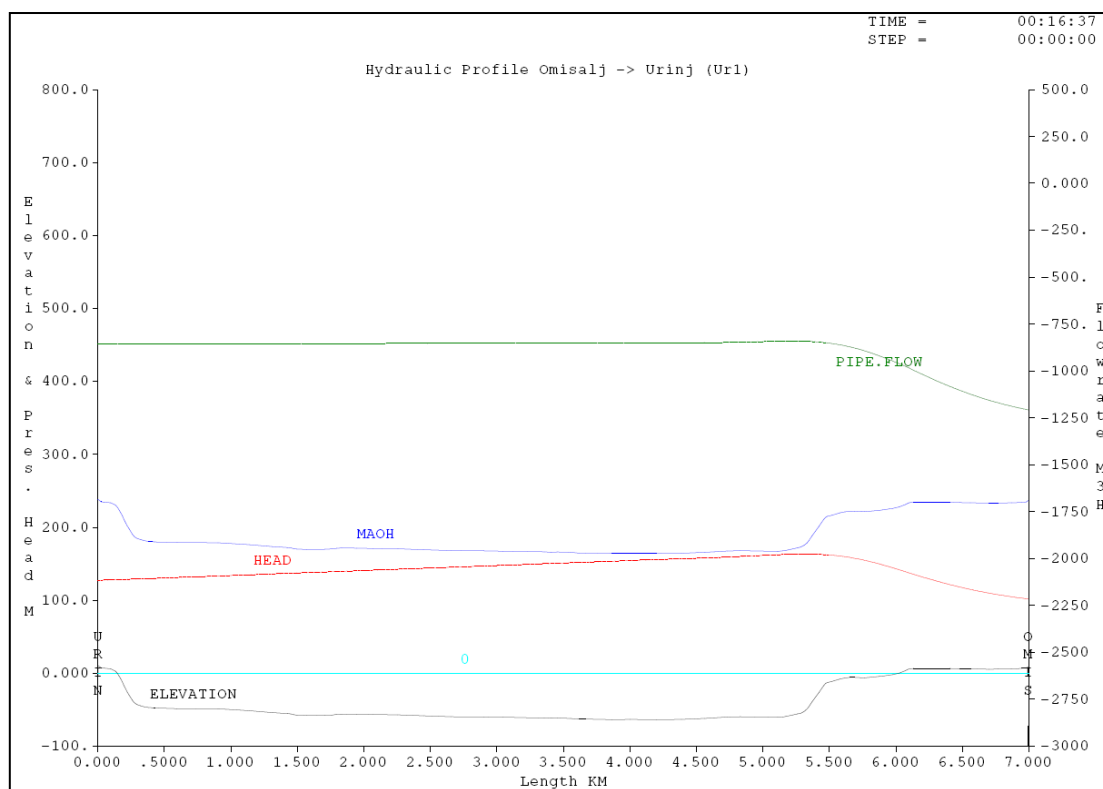
⁵ maximum allowable surge pressure



Slika 25. Transfer od Om2 do Ur1 (Tlačni val, vrijeme 16:33 min)

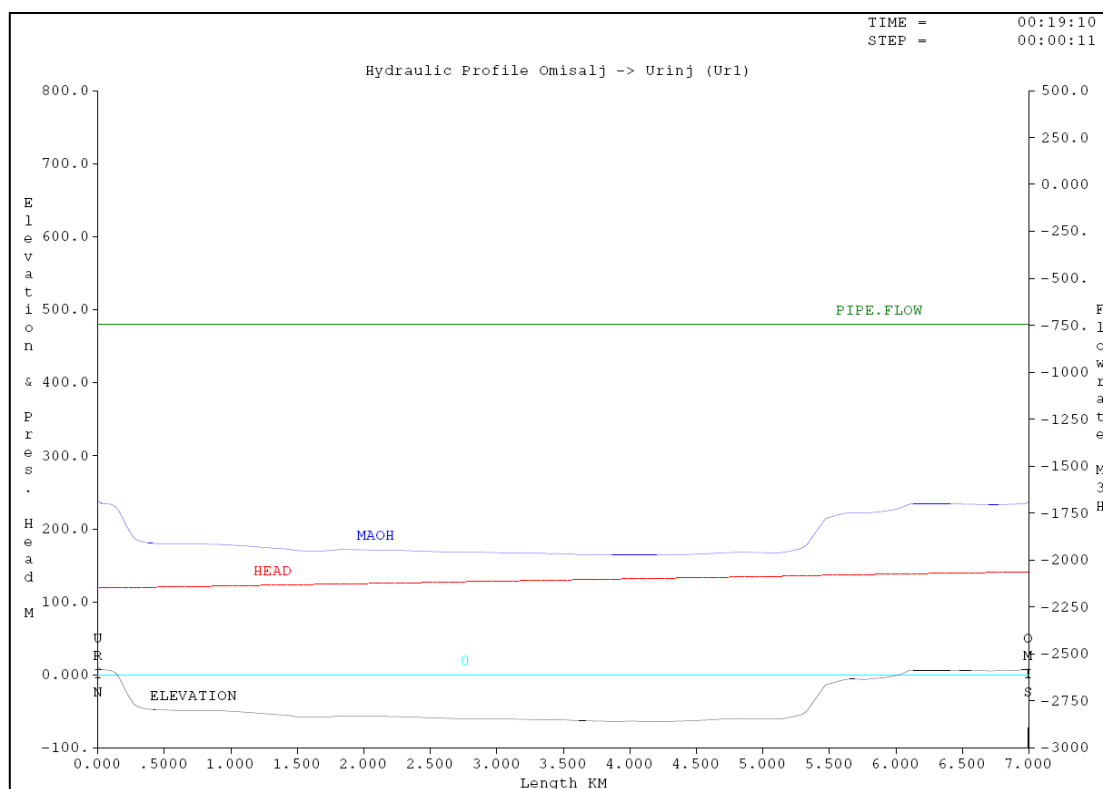
Slika 25 prikazuje kako se tlak povećava uzvodno od zatvorenog ventila točno nakon zatvaranja ventila. Tlak raste iznad 9 bar u kojem slučaju odušni ventil počne djelovati i javlja se protok od približno 900 m³/h. Odušni ventil onemogućuje daljnje povećanje tlaka uzvodno od Urinja prema Omišlju.

Tlačni val, koji je prouzročen zatvaranjem ventila na Urinju, putuje prema Omišlju i dostiže liniju maksimalnog dopuštenog tlaka nizvodno od Omišlja (Slika 26).



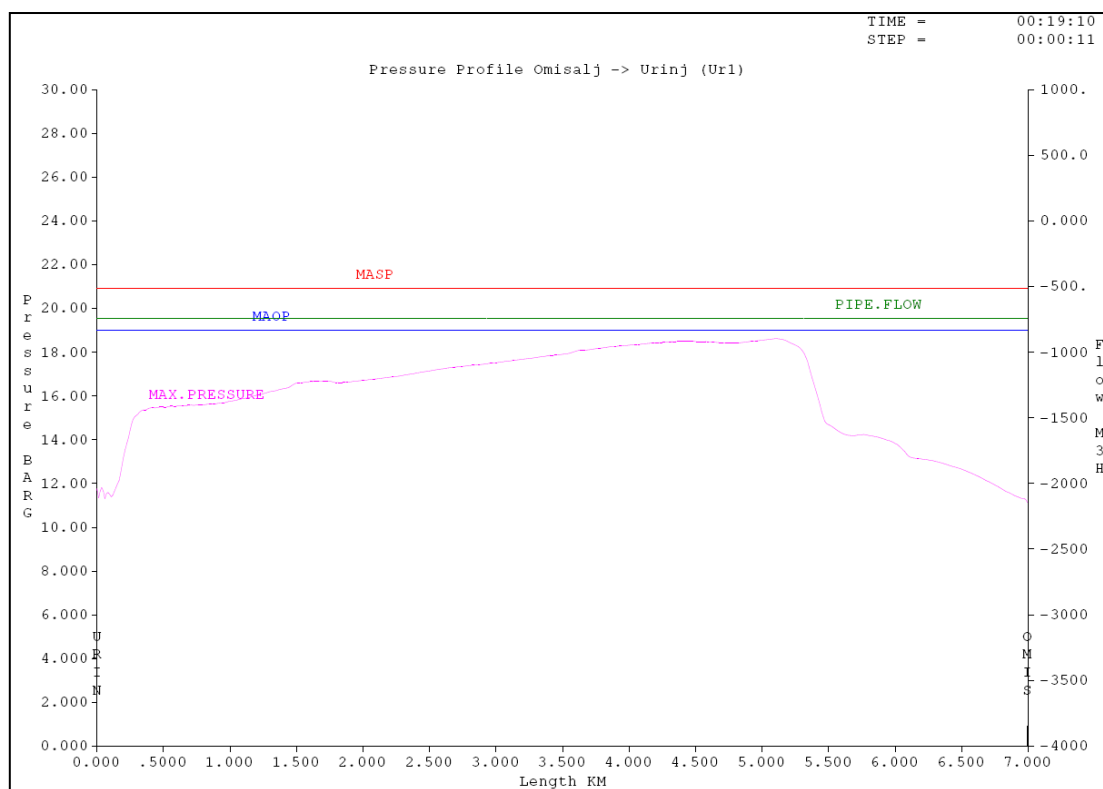
Slika 26. Transfer od Om2 do Ur1 (Tlačni val prema Omišlju)

Pošto pumpa na Omišlju i dalje transportira naftu kroz cjevovod novo stabilno stanje se dostiže nakon nekog vremena. Novonastalo stanje daje protok od $744 \text{ m}^3/\text{h}$. Sva tekućina (nafta) koja je ušla u cjevovod je usmjerena prema odušnom rezervoaru koji se aktivira ako tlak na ventilu dostigne 9 bar što je prikazano na slici 27.



Slika 27. Transfer od Om2 do Ur1 (Tlačni val, vrijeme 16:33 min)

Približno 65 m³ sirove nafte je dospjelo u odušni spremnik nekoliko minuta nakon što se otvorio odušni ventil, što je bilo prouzročeno zatvaranjem ventila. U navedenom slučaju nije došlo do povećanja tlaka u cjevovodu preko maksimalno dopušteng tlaka u sustavu.

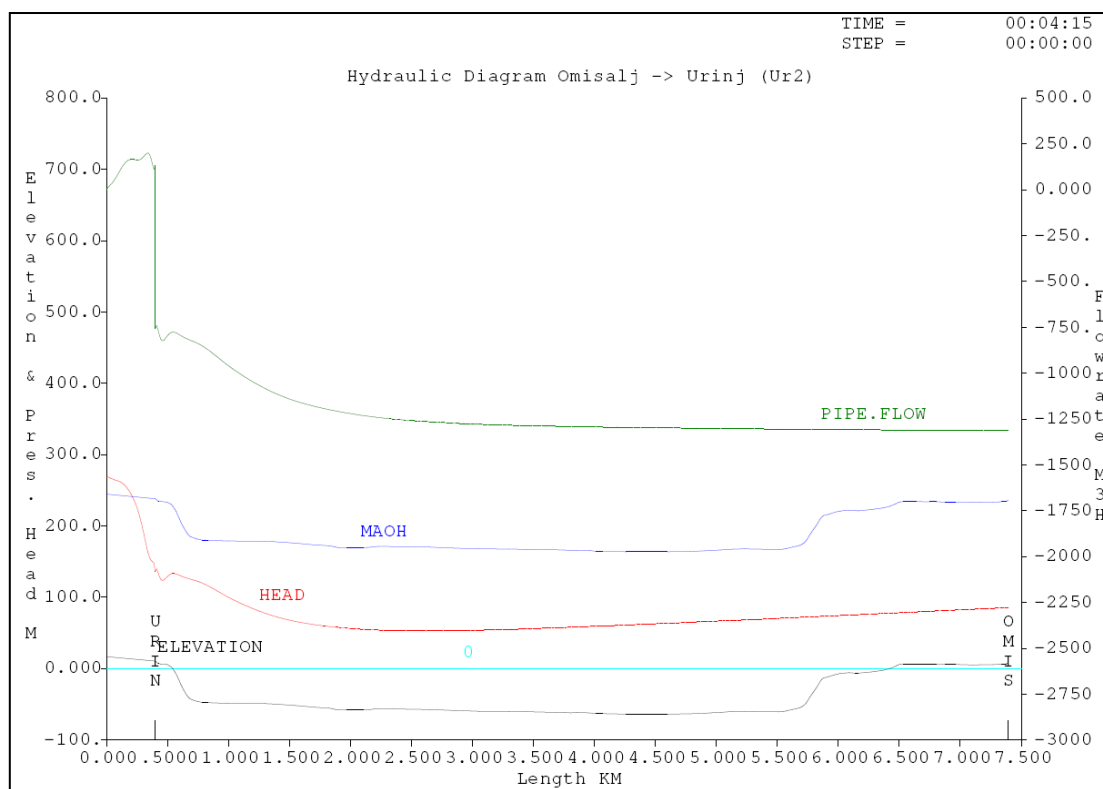


Slika 28. Transfer od Om2 do Ur1 (Maksimalni tlak u cjevovodu)

Zatvaranje ventila spremnika na Urinju

Zatvaranje ventila dok traje transport nafte od Omišlja do Urinja prouzrokuje povećanje tlaka uzvodno od zatvorenog ventila spremnika. Sve dok se spremnik na Urinju nalazi blizu odušne stanice na ulazu u Urinju, ovakvo kratkotrajno opterećenje ne prouzrokuje problem za sustav. Bez obzir na to pretpostavljajući stalni protok, što je dalje spremnik na Urinju od odušnog ventila, to se javlja veći tlak u cjevovodu.

Slika 29 prikazuje dinamički odziv nakon zatvaranja ventila na ulazu u rezervoar za slučaj transporta sirove nafte od Om2 (ispunjen spremnik) do Ur3 (prazan spremnik) pri protoku od $1316 \text{ m}^3/\text{h}$. Vrijeme potpunog zatvaranja ventila koje je uzeto u modelu je 5 min.

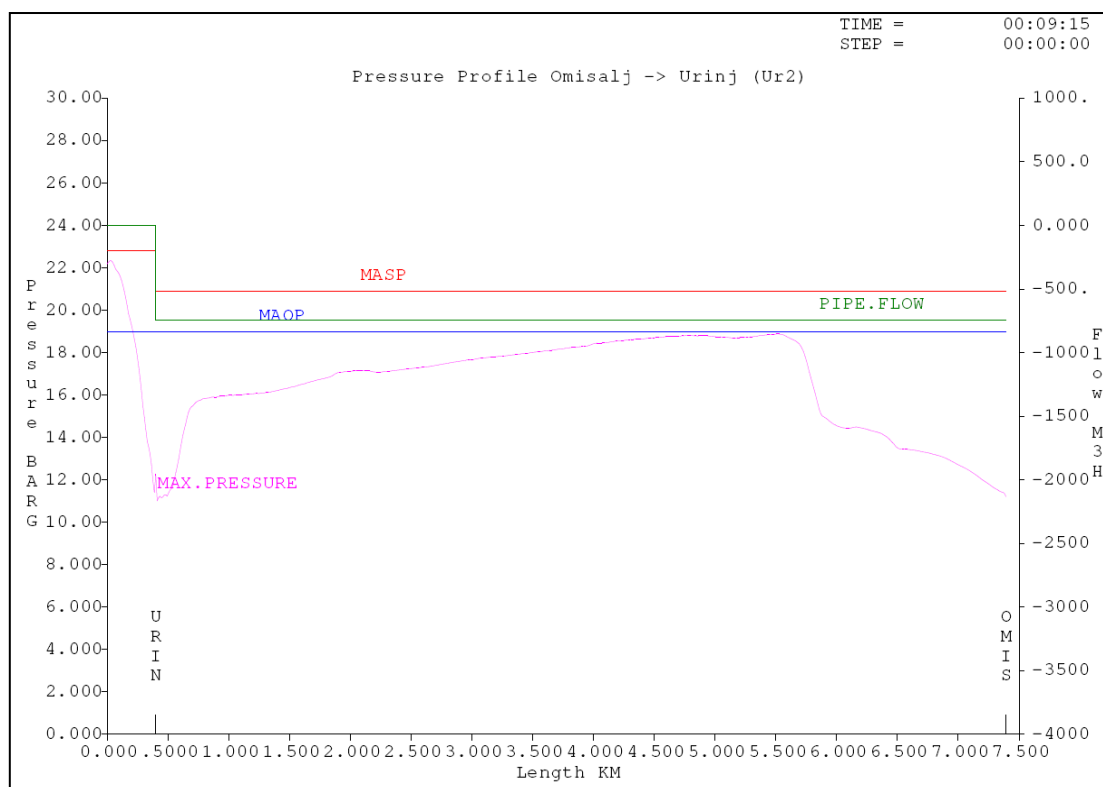


Slika 29. Transfer od Om2 do Ur2 (Zatvaranje ventila spremnika na Urinju)

Nakon zatvaranja ventila tlak uzvodno od zatvorenog ventila se povećava i premašuje maksimalno dopušteni tlak sustavu (MAOP). U tom trenutku se otvara odušni ventil na ulazu u Urinj koji se otvara na 9 bar i ne dozvoljava se da se tlačni val širi nazad u cjevovod.

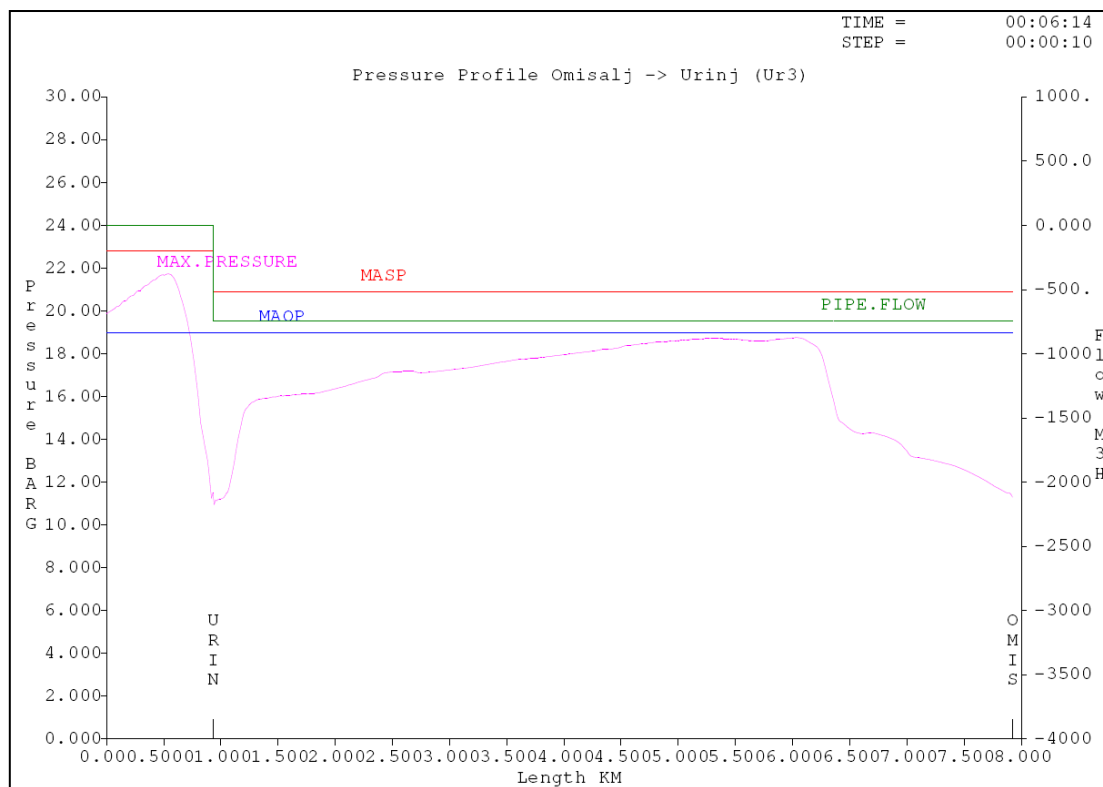
Početni odušni protok iznosi oko 1500 m³/h. Nakon nekog vremena se javlja novo stabilno stanje i protok koji dolazi iz Omišlja (744 m³/h) usmjerava se prema odušnom spremniku na Urinju. Nakon 5 minuta u odušnom spremniku se nalazi približno 65 m³.

Sa danim vremenom zatvaranja ventila spremnika od 5 min, tlak u cjevovodima na Urinju premašuje maksimalno dopušteni tlak što može prouzročiti oštećenja i pukotine na cjevovodima na Urinju. Da bi se spriječila oštećenja vrijeme zatvaranja ventila bi trebalo biti veće od 5 min, jer u tim slučajevima se lakše sprečava nastajanje oštećenja jer odušni ventil brže reagira i stabilizira se tlak u sustavu.



Slika 30. Transfer od Om2 do Ur2 (maksimalni tlak u sustavu)

Simulacija je provedena i za slučaj transporta nafte od Om2 (pun spremnik) do Ur3 (prazan spremnik) pri protoku od 1121 m³/h sa vremenom zatvaranja ventila od 2 min. U ovom slučaju ne dolazi do povišenja tlaka u sustavu preko maksimalno dopuštenog tlaka kao što je vidljivo na slici 31.



Slika 31. Transfer od Om2 do Ur3 (maksimalni tlak u sustavu)

Isto kao u prethodnom slučaju za transport nafte iz dupkom napunjenog spremnika na Omišlju (Om2) do nisko ispunjenog spremnika na Urinju (Ur4), pri protoku u sustavu 976 m³/h ne dolazi do kritično visokog tlaka u cjevovodu ni za manja vremena zatvaranja ventila.

3.5 TRANSPORT NAFTE OD URINJA DO OMIŠLJA

Na Urinju se nalaze 3 pumpe koje se mogu koristiti za prijenos nafte prema Omišlju što bi se moralo odvijati samo u nužnim slučajevima. Prijenos nafte s Urinja prema Omišlju nije planiran niti se koristi u stvarnosti, ali u ovom radu će se simulirati transport u slučaju da se bude morao koristiti povratni transport nafte.

Na Urinju se nalaze 3 pumpe koje se mogu koristiti za transport nafte prema Omišlju. Glavne karakteristike pumpi na Urinju dane su sljedećim slikama.

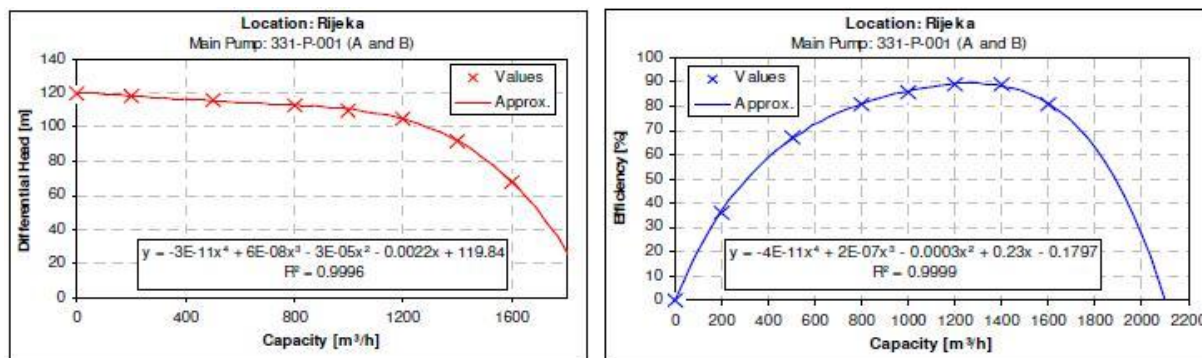
Shema dionice Urinj – Omišalj prikazana je u Prilogu 2

Dvije pumpe:

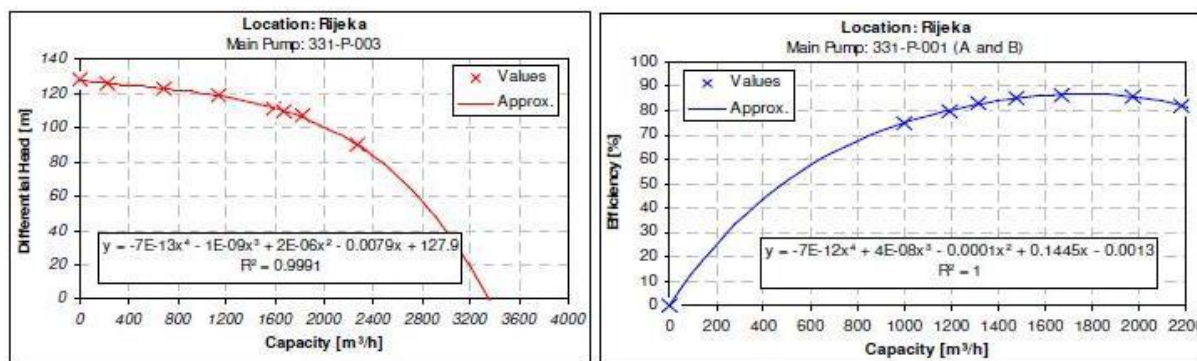
- Protok - 1000 m³/h
- Visina dobave – 110 m
- Brzina vrtnje – 1450 °/min
- Snaga – 400 kW

Jedna pumpa:

- Protok – 1670 m³/h
- Visina dobave – 112 m
- Brzina vrtnje – 1480 °/min
- Snaga – 730 kW



Slika 32. Karakteristike slabijih pumpi na Urinju

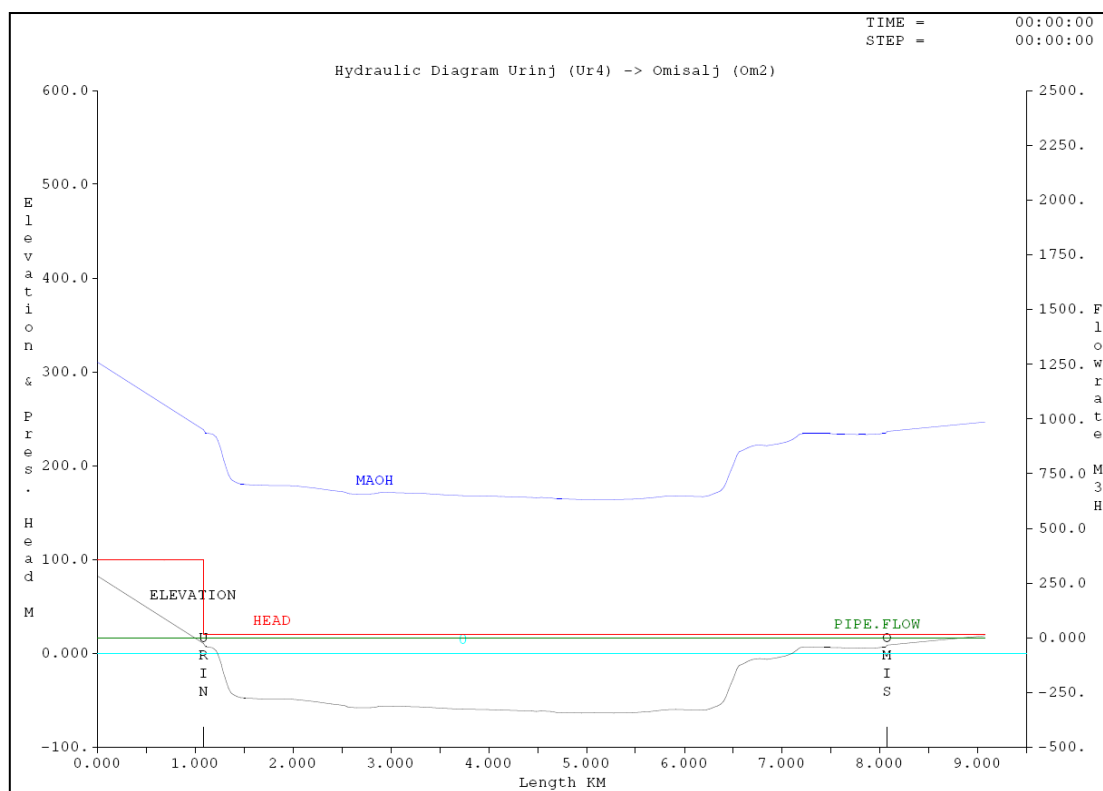


Slika 33. Karakteristika treće pumpe na Urinju

Kao što je već navedeno Spremnici na Urinju su raspoređeni na 4 različite nadmorske visine te smo im stavili oznake Ur1 – Ur4. Spremnik na Omišlju, koji u ovom slučaju prima naftu, je smješten na razini od 18.9 m od mora, te je označen sa Om2.

Pokretanje sustava (Urinj - Omišalj)

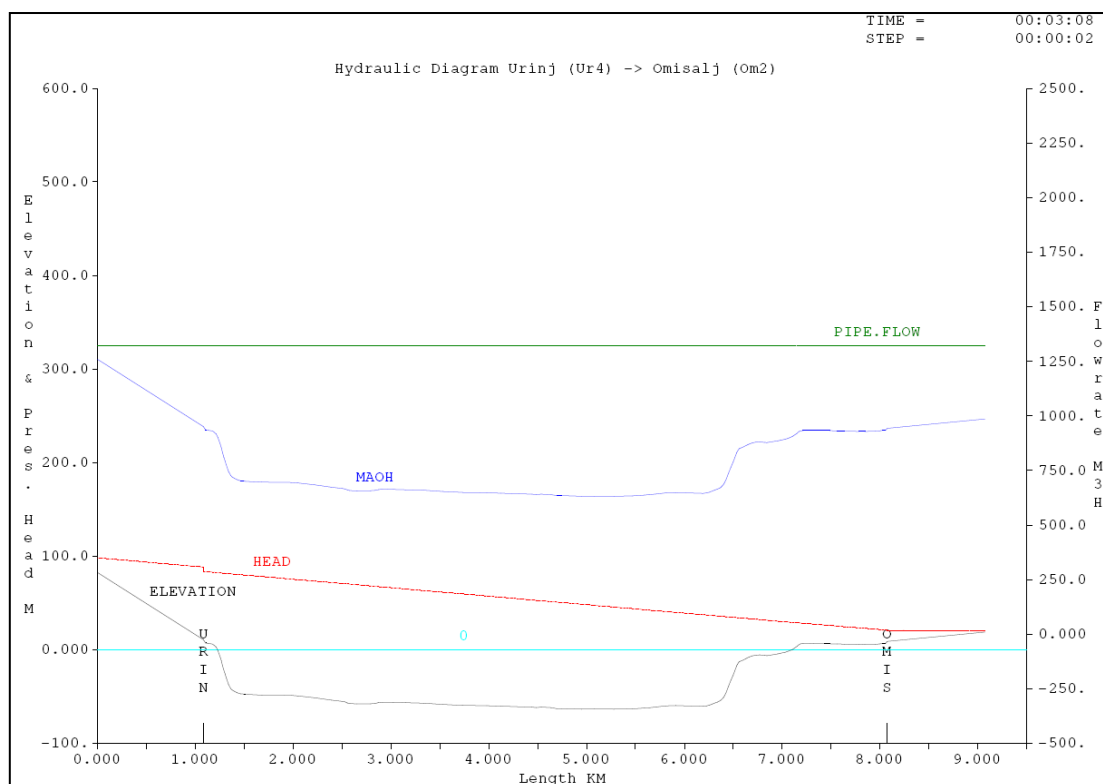
Pokretanje sustava će se pokazati u slučaju transporta nafte od Urinja do Omišlja iz spremnika lociranog na najvišoj nadmorskoj visini na Urinju (Ur4) koji je najviše ispunjen naftom do spremnika Om2 koji je najmanje ispunjen naftom. Ovakva situacija će prouzročiti maksimalni protok na dionici između Urinja i Omišlja zbog toga što je usisni tlak na pumpi najveći mogući.



Slika 34. Početno stanje cjevovoda (Ur-Om)

Slika 34 pokazuje početno stanje u sustvu prije otvaranja izlaznog ventila na Urinju. Tlak sa strane ventila prema Urinju iznosi 8 bar, a sa strane Omišlja 0.8 bar. Ovi tlakovi su uzrokovani razinom tekućine u spremnicima.

Budući da je u ovakvom transportu spremnik koji prima naftu na nižoj nadmorskoj visini nego spremnik koji šalje naftu moguć je transport nafte s obzirom na gravitaciju. Gravitacijski protok se pokreće jednostavnim otvaranjem izlaznog ventila na Urinju. U takvim uvjetima će se uspostaviti protok od $1327 \text{ m}^3/\text{h}$ što se vidi na sljedećoj slici.

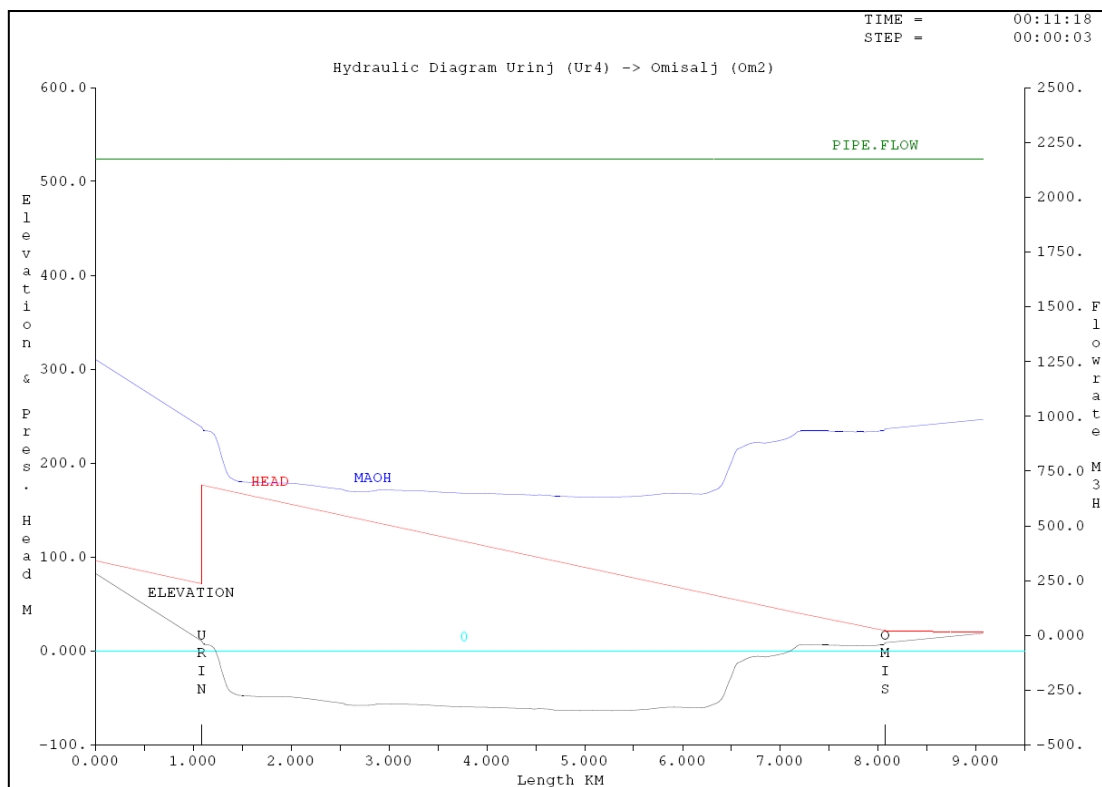


Slika 35. Gravitacijski protok (Ur-Om)

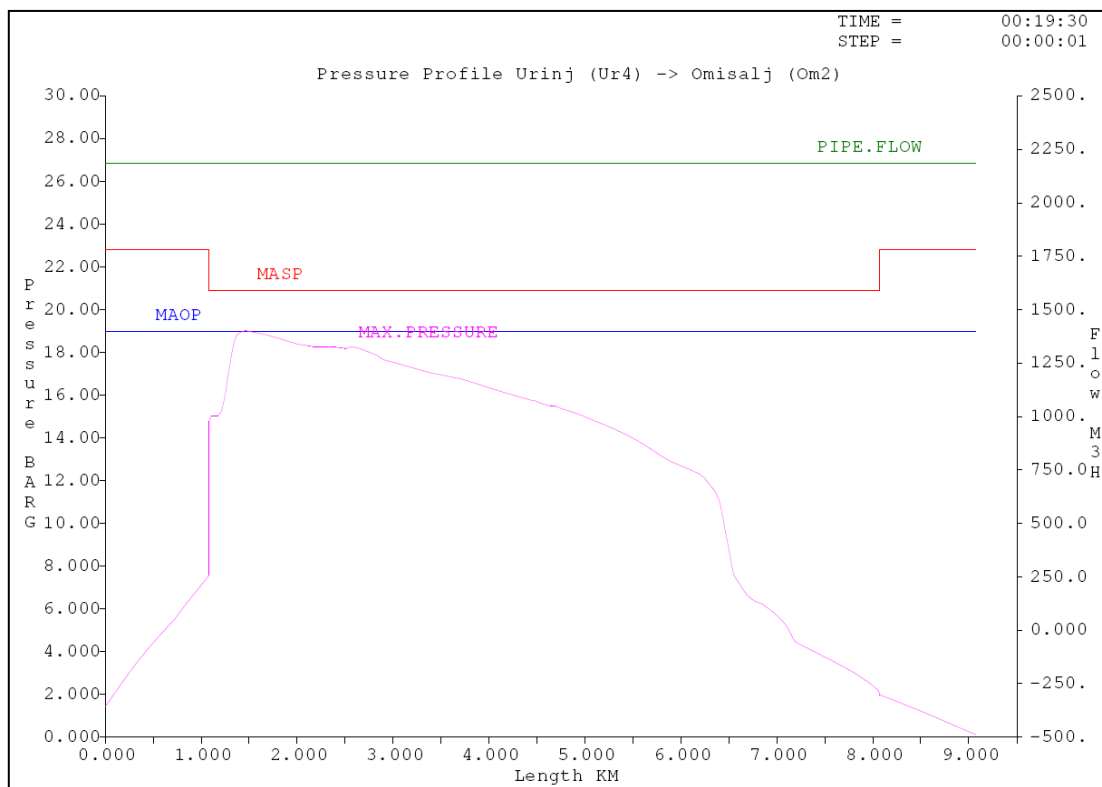
Nakon što se postigne stabilno stanje gravitacijskog protoka, pokreće se prva pumpa. Tlak u sustavu se povećava. Minutu nakon što se pumpa, u konfiguraciji (1+1) pokrenula dostigne se protok od $1765 \text{ m}^3/\text{h}$.

Nakon što se postigne stabilno stanje pokrene se druga pumpa (2+0 konfiguracija) i tlak u sustavu se povećava do $2186 \text{ m}^3/\text{h}$. Tlak sa izlazne strane pumpi poveća se do 14 bar. Ulazni tlak na ulazu u Omišalj iznosi 1.2 bar.

Svaka pumpa daje protok od $1093 \text{ m}^3/\text{h}$ i ima usisni tlak od 5.2 bar. Visina dobave pumpe u ovom slučaju je 108 m.



Slika 36. Pokretanje druge pumpe (Ur4-Om2, 2+0 konfigur.)



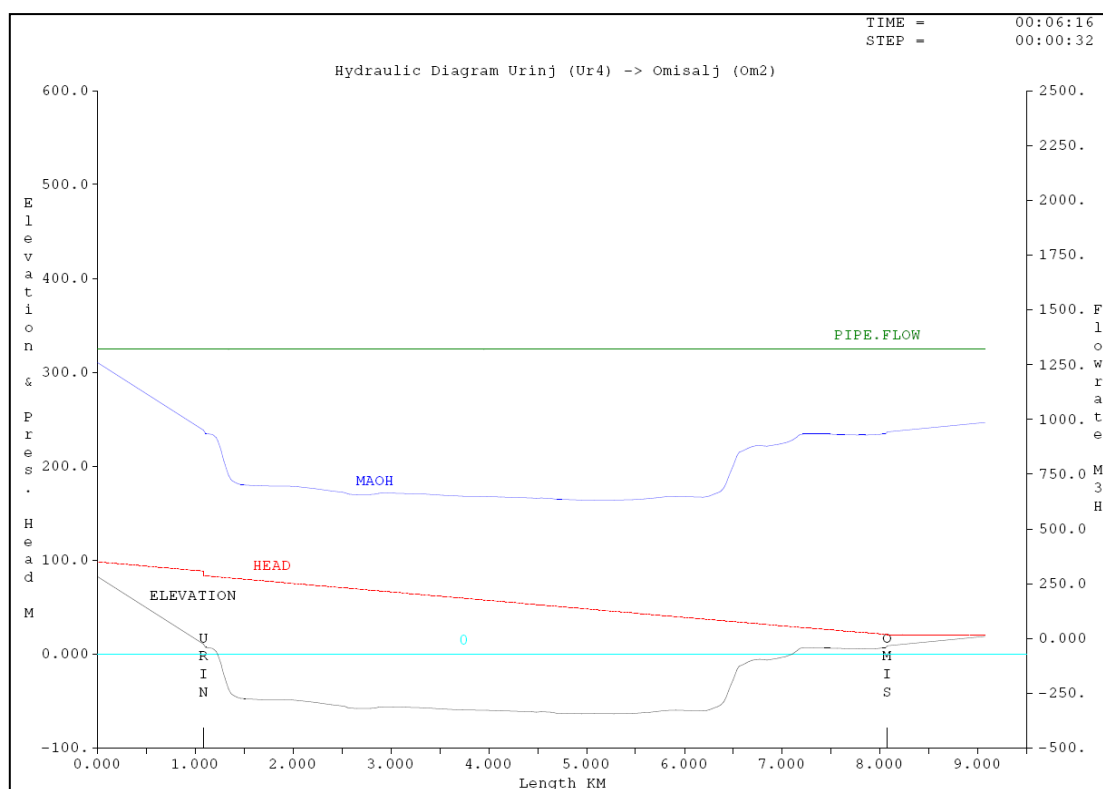
Slika 37. Maksimalni tlak (Ur4-Om2)

Prekid transporta nafte (Urinj - Omišalj)

Prekid transporta nafte od Urinja do Omišlja se odvija postepeno. Pumpe se isključuju jedna za drugom što uzrokuje postepeno smanjenje protoka u cjevovodu. Protok u cjevovodu će postepeno pasti do nule te će se tlak smanjiti do statičkog tlaka na Omišlju. Svi ventili ostaju otvoreni dok se ne stabilizira novonastalo stanje u cjevovodu.

Prekid transporta nafte će se pokazati u slučaju transporta od Ur4 do Om2 gdje se nafta tlači s dvije pumpe (2+0) konfiguracija. Zbog velikih protoka dolazi do velikog tlaka.

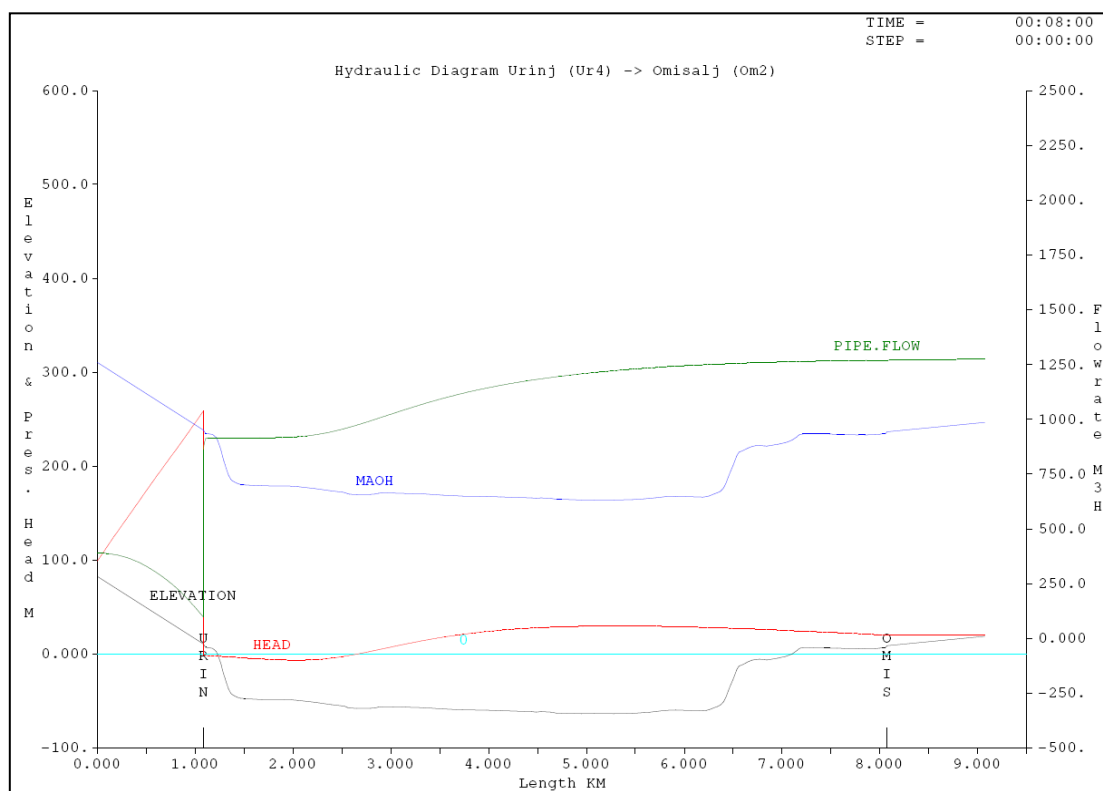
Nakon isključivanja prve pumpe protok i tlak u sustavu se smanjuju. Kad se stabilizira sustav isključuje se i druga pumpa, nakon čega ostaje samo gravitacijski protok. U ovom slučaju protok se smanji do značajnih $1327 \text{ m}^3/\text{h}$ što pokazuje sljedeća slika.



Slika 38. Gravitacijski protok nakon gašenja cjevovoda (Ur4-Om2)

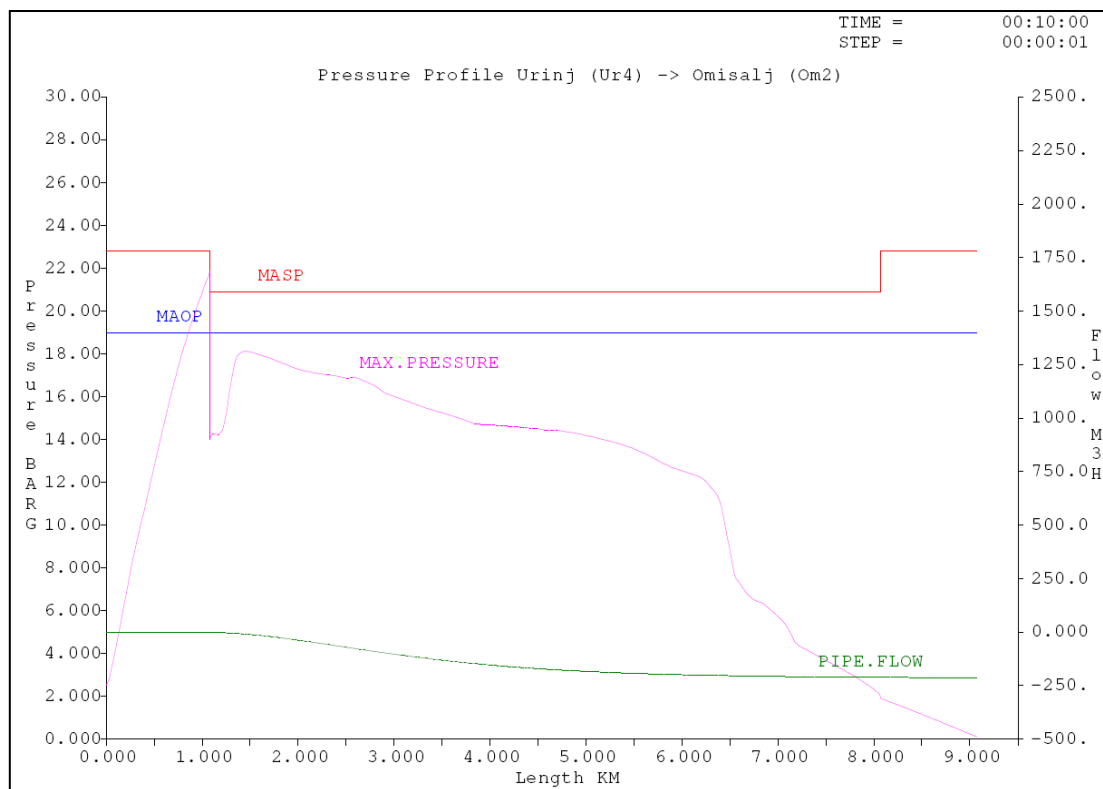
Brzo zatvaranje izlaznog ventila na Urinju može dovesti do velikog pritiska uzvodno od ventila, što može dovesti do povećanja tlaka iznad dopuštenog. Zbog tog bi zatvaranje ventila na Urinju trebalo trajati ne manje od 5 minuta.

Sljedeća slika prikazuje tlak i protok u sustavu u trenutku kad se ventil zatvori do kraja. Vrijeme zatvaranja u ovom primjeru je 5 minuta. Kao što se može vidjeti MAOP je prijeđen, ali MASP se ne prelazi. Jer je vrijeme zatvaranja dovoljno dugo.



Slika 39. Zatvaranje izlaznog ventila na Urinju (Ur4-Om2)

Na sljedećoj slici je prikazan maksimalni tlak u cjevovodu tijekom procesa prekida transporta nafte. Tlak na ventilu se poveća do 22.4 bar i pod tim pritiskom je još ne prelazi kritični tlak u sustavu, nego je na granici.



Slika 40. Maksimalni tlak u sustavu kod gašenja pumpe (Ur4-Om2)

Sve dok je vrijeme zatvaranje ventila dovoljno dugo, ne dolazi do pre velikog pritiska u sustavu što bi moglo uzrokovati oštećenja po cjevovod.

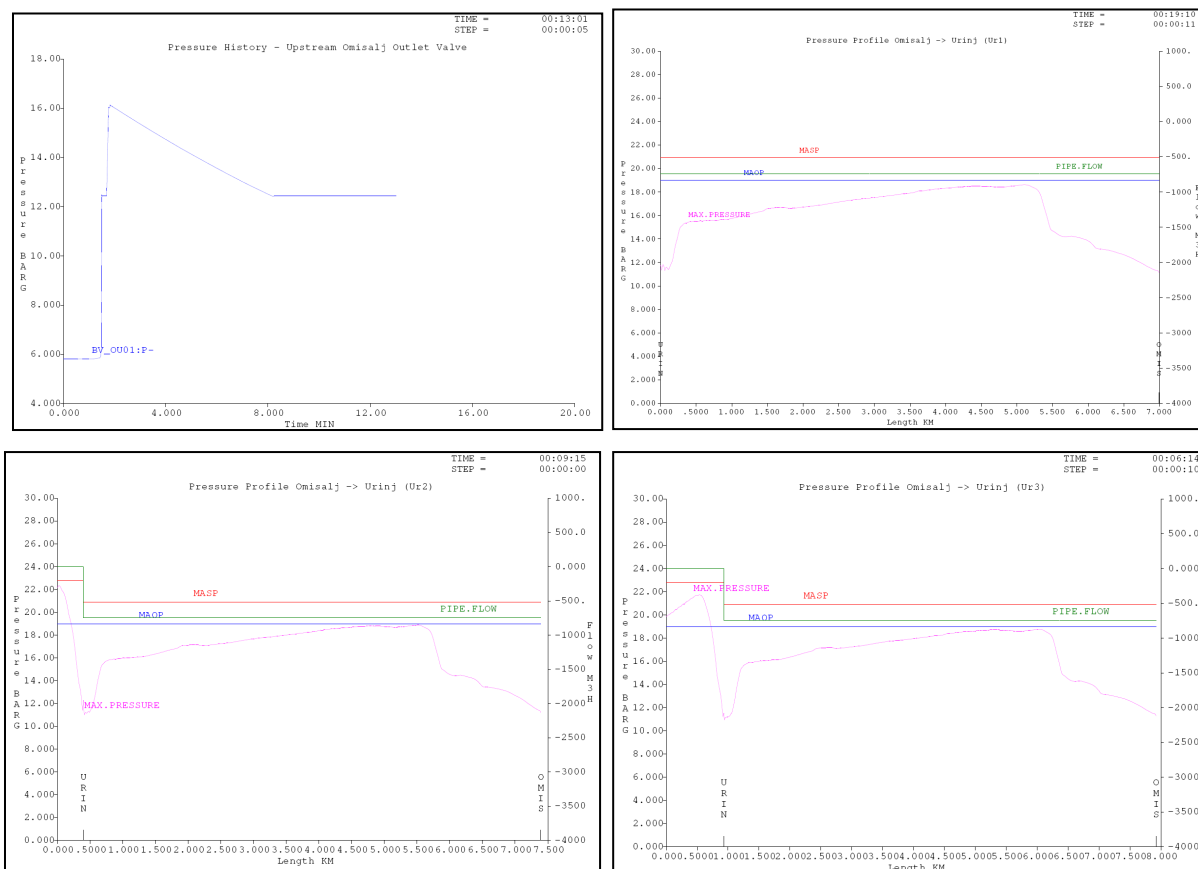
3.6 USPOREDBE

Kod transporta nafte od Omišlja prema Urinju može doći do velikog porasta tlaka u sustavu. U slučaju tlaka u sustavu koji prelazi maksimalno dozvoljeni tlak od 21 bar može doći do pucanja cijevi ili ventila koji se nalaze u sustavu što daljnim slijedom vodi do neočekivanih troškova sanacije nastalog puknuća ili kvara.

Kroz prethodno navedene slučajeve transporta nafte od Omišlja do Urinja uvidjelo se da se tlak u sustavu povećava kod nenadanog kratkotrajnog opterećenja sustava i to u slučajevima zatvaranja ventila na izlaznu iz Omišlja, na ulazu u Urinj i na ventilu spremnika na Urinju.

U navedenim slučajevima kratkotrajnog opterećenja postavljeno je dovoljno dugo vrijeme zatvaranja ventila. Tako je za vrijeme zatvaranja ventila na Omišlju i Urinju uzeto vrijeme zatvaranja od 1:30 min, a na spremniku na Urinju 5 min.

Na slikama 24, 28, 30 i 31 pokazalo se da tlak u sustvu dostiže granicu od maksimalno dozvoljenog.



Slika 41. Usporedba maksimalnog tlaka u sustavu za različite slučajeve

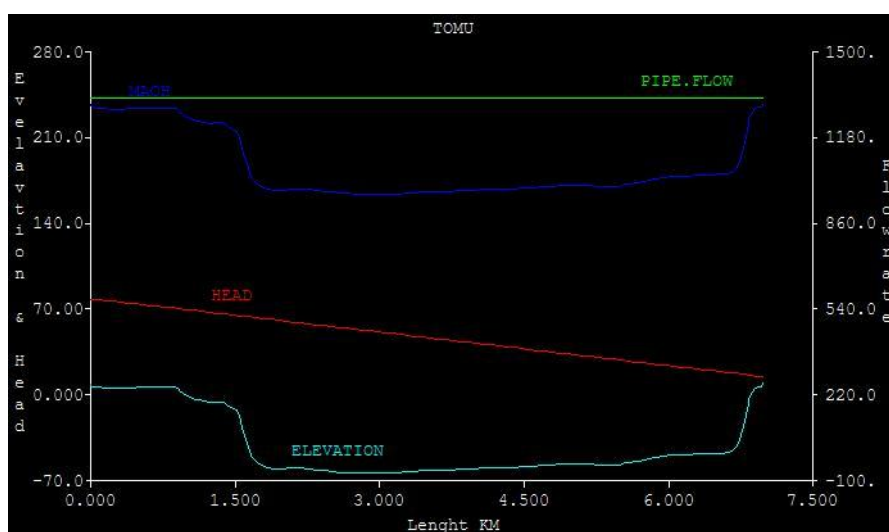
Ako vrijeme zatvaranja ventila padne ispod navedenih vrijednosti iz različitih razloga, kao neočekivanog kvara ventila ili ljudske pogreške dolazi do povećanja tlaka iznad maksimalno dopuštenog tlaka u sustavu, a samim time i do pucanja cjevovoda te samih ventila pod utjecajem tlaka.

U poglavlju 4. će se ovakav problem pokušati riješiti ugradnjom odgovarajuće opreme sustava upravljanja.

4. SUSTAV UPRAVLJANJA

Poboljšanje upravljanja sustava će se objasniti u slučaju transporta nafte sa Omišlja (Om2) do Urinja (Ur1). U ovom slučaju dolazi do maksimalnog protoka u cjevovodu. Visina tekućine u spremniku na Omišlju je 17 m, a visina tekućine u spremniku na Urinju je 1.35 m. Ovakav transport nafte i stanja u cjevovodu pokazali smo u poglavlju 4.1.1.

Slika 42 prikazuje stabilno stanje u cjevovodu dok pumpa radi punom snagom.



Slika 42. Ovisnost visine i protoka o udaljenosti (stabilno stanje)

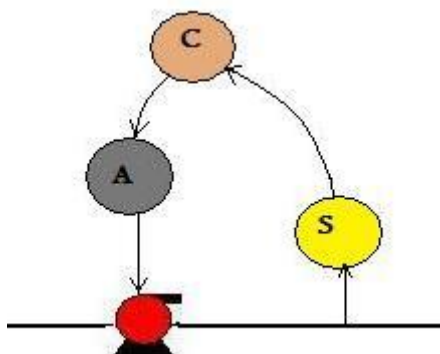
Odgovarajući protok nakon postizanja stabilnog stanja je $1337 \text{ m}^3/\text{h}$. Pumpa u radu ima usisni tlak od 1.7 bar a izlazni tlak od 9.2 bar. Pumpa daje visinu dobave od 89 m i ima broj okretaja $1468 \text{ }^\circ/\text{min}$.

4.1 UPRAVLJENJE PUMPOM

Da bi upravljali radom pumpe odnosno njenim protokom moramo postaviti određene elemente koji nam omogućuju uvid u postojeće stanje te šalju signal pumpi o uvjetima u cjevovodu i isto tako šalju upravljački signal. U ovom slučaju upravljanja pumpom potrebna su tri elementa: senzor (S), kontroler (C) i aktuator (A). Njih moramo postaviti u određeni redoslijed zbog odgovarajućeg signala koji ide od cjevovoda odnosno izlaznog dijela pumpe do upravljačkog elementa. [6]

U ovom slučaju će se direktno mjeriti protok u cjevovodu pomoću senzora.

Slika 43 prikazuje upravljački sistem.



Slika 43. Upravljački sistem

Na cjevovod je priključen senzor (S) koji izravno mjeri protok u cjevovodu. Karakteristike senzora korištene u SPS-u dane su sljedećom slikom.

Item	Value	Description
NAME	SENS1	Unique device name
CNC	+OUP01	Name of device or Input Reference where the Sensor is connected
TYPE	FLOW	Sensor type
VZCURV	Linear (built-in)	Data curve of the output signal vs sensed value
V1	<input type="checkbox"/> 0.00	Value for the Sensor output
V2	<input type="checkbox"/> 1100.00	Value for the Sensor output
Z1	<input type="checkbox"/> 0.00	Corresponding value for the sensed variable
Z2	<input type="checkbox"/> 1100.00	Corresponding value for the sensed variable

Slika 44. Karakteristike senzora korištene u SPS-u

Senzor šalje signal PID kontroleru (C) pomoću kojeg se upravlja rad pumpe, u ovom slučaju protok pumpe.

Item	Value	Units	Description
NAME	C		Unique device name
IN	S SENS1		Source of input signal
SP	1400		Source of set point signal
KC	V 1.2		Gain
TD	<input type="checkbox"/> 0.01	MIN	Derivative time
TI	<input type="checkbox"/> -0.16666	MIN	Reset (integral) time
VS	<input type="checkbox"/> 0.00		Output bias
NC	<input type="checkbox"/> -5000.00		Normalization constant
INTEG	<input type="checkbox"/> 0.00		Initial value for the integral term

Slika 45. Karakteristike kotrolera korištene u SPS-u

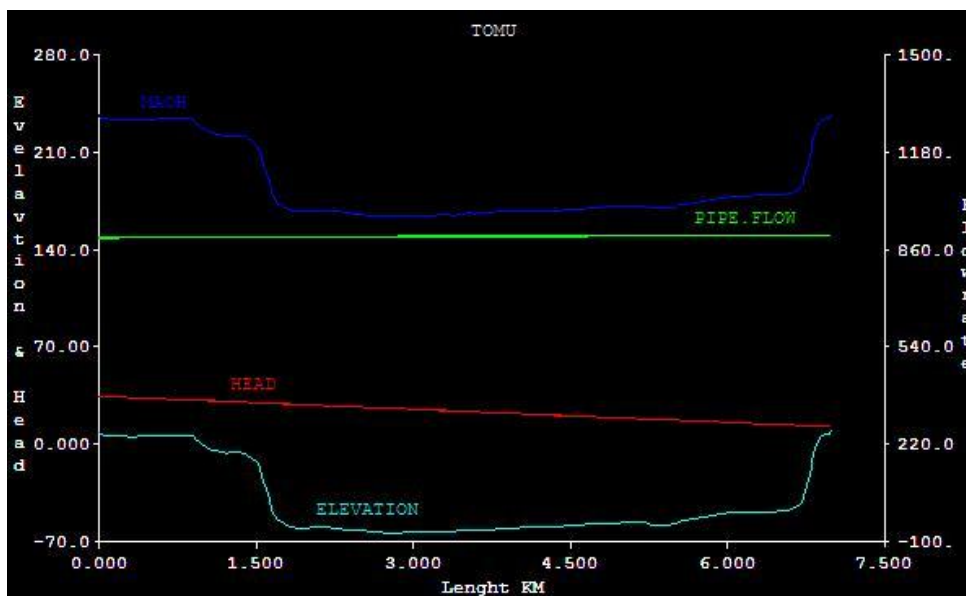
Kontroler upravlja aktuatorom (A) koji upravlja pumpom.

Item	Value	Description
NAME	ACTUATOR1	Unique device name
LNAME	C C	Name of device furnishing in input signal
PEQUIP	R OUP01	Name of the equipment controlled by the actuator
XV-CRV	Linear (built-in) ▼	Data curve defining actuator output vs input
V0	<input type="checkbox"/> 0.00	Input limit where X(V0) = 0
V1	<input type="checkbox"/> 1.00	Input limit where X(V1) = 1
TYPE	Rate constant ▼	Method for specifying actuator rate
VR	<input type="checkbox"/> 1.00	Rate constant

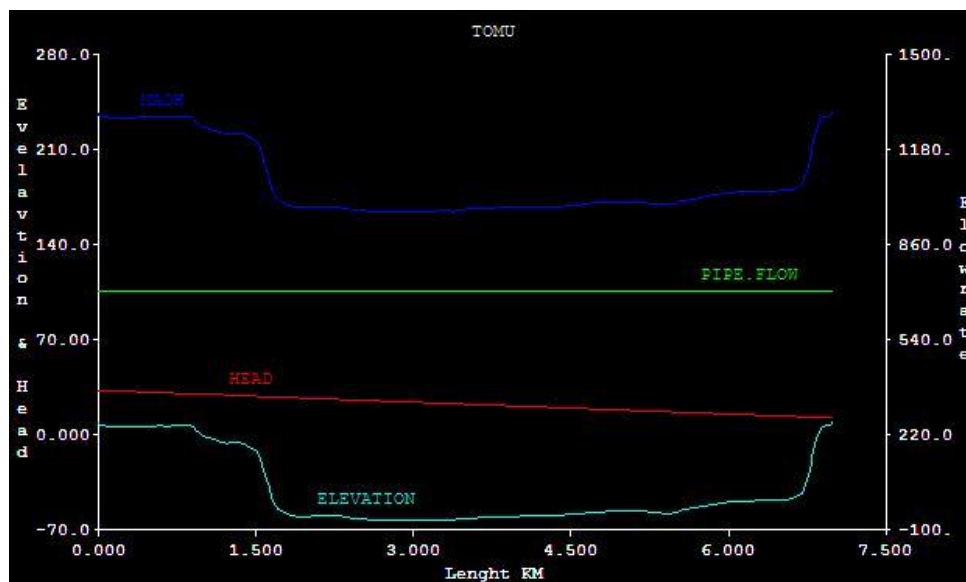
Slika 46. Karakteristike aktuatora korištene u SPS-u

Pomoću upravljačkog sustava pokazat će se kako možemo smanjiti i povećati protok, a time i tlak u sustavu.

Nakon dostignutog stabilnog stanja kao što je prikazano na slici 47, gdje pumpa radi maksimalnim brojem okretaja (u vremenu od $t = 2:45$ min), pomoću kontrolera će se direktno smanjiti protok u sustavu. Kontroleru će se zadati da se protok na izlazu iz pumpe mora smanjiti na $700 \text{ m}^3/\text{h}$.

Slika 47. Smanjenje protoka uvjetovano kontrolerom ($t = 3$ min.)

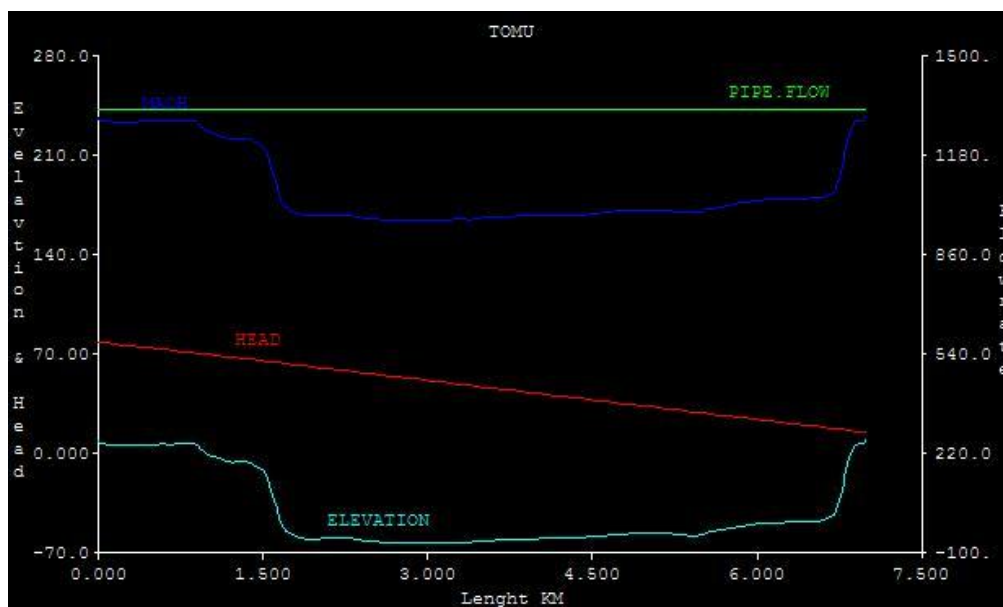
U vremenu od 7:05 minuta dolazi do stabilizacije sustava i uspostavlja se zadani protok od $700 \text{ m}^3/\text{h}$. Uisni tlak na pumpi iznosi 1.519 bar, a izlazni tlak iznosi 3.04 bar. Brzina vrtnje, kad protok iznosi $700 \text{ m}^3/\text{h}$, je $\omega = 686.641^\circ/\text{min}$.

Slika 48. Protok od $700 \text{ m}^3/\text{h}$

Sljedeći zadani protok će biti na $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ (vrijeme $t = 10:02$ min.). U tom se slučaju povećava protok, a samim time i tlakovi (slika 37).

Karakteristike pumpe pri tom protoku su:

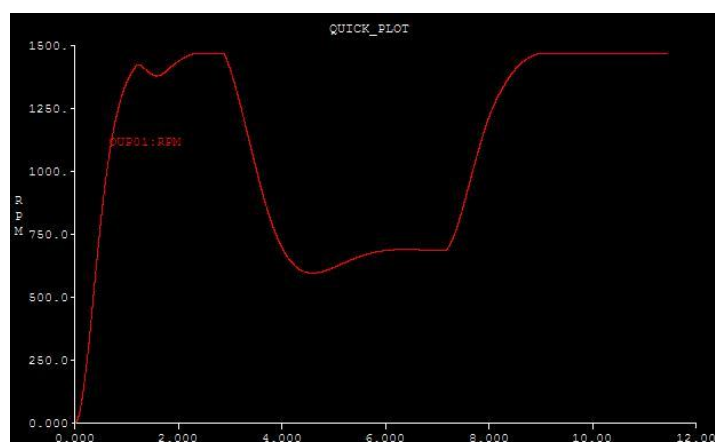
- Usisni tlak – 1.21 bar
- Izlazni tlak – 9.127 bar
- Brzina vrtnje – 1448 °/min



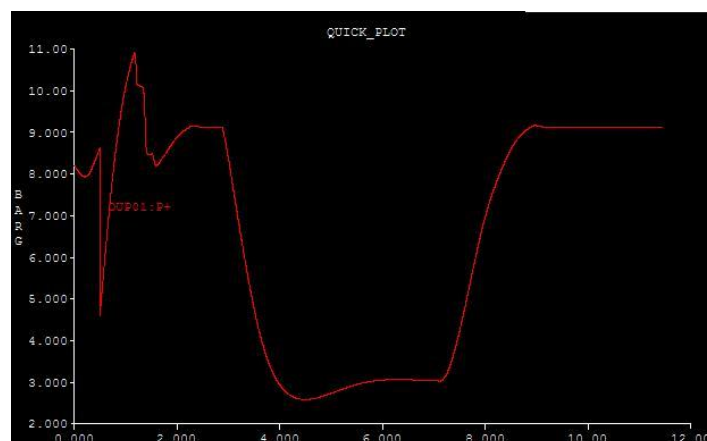
Slika 49. Protok od 1200 m³/h (t = 10.02 min.)

Upravljanje izlaznim protokom pumpe, odnosno samim time i pumpe pokazalo se da je korisno postaviti upravljački sustav sa senzorom, kontrolerom i aktuatorom zbog brzog upravljanja pumpom.

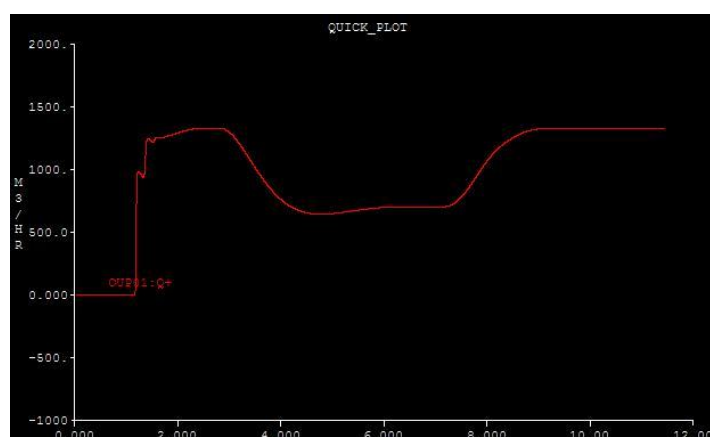
Sljedećim slikama je prikazana promjena brzine vrtnje, protok i izlazni tlak pumpe u vremenu za prethodni slučaj upravljanja.



Slika 50. Promjena brzine vrtnje



Slika 51. Promjena tlaka



Slika 52. Promjena količine protoka

5. ZAKLJUČAK

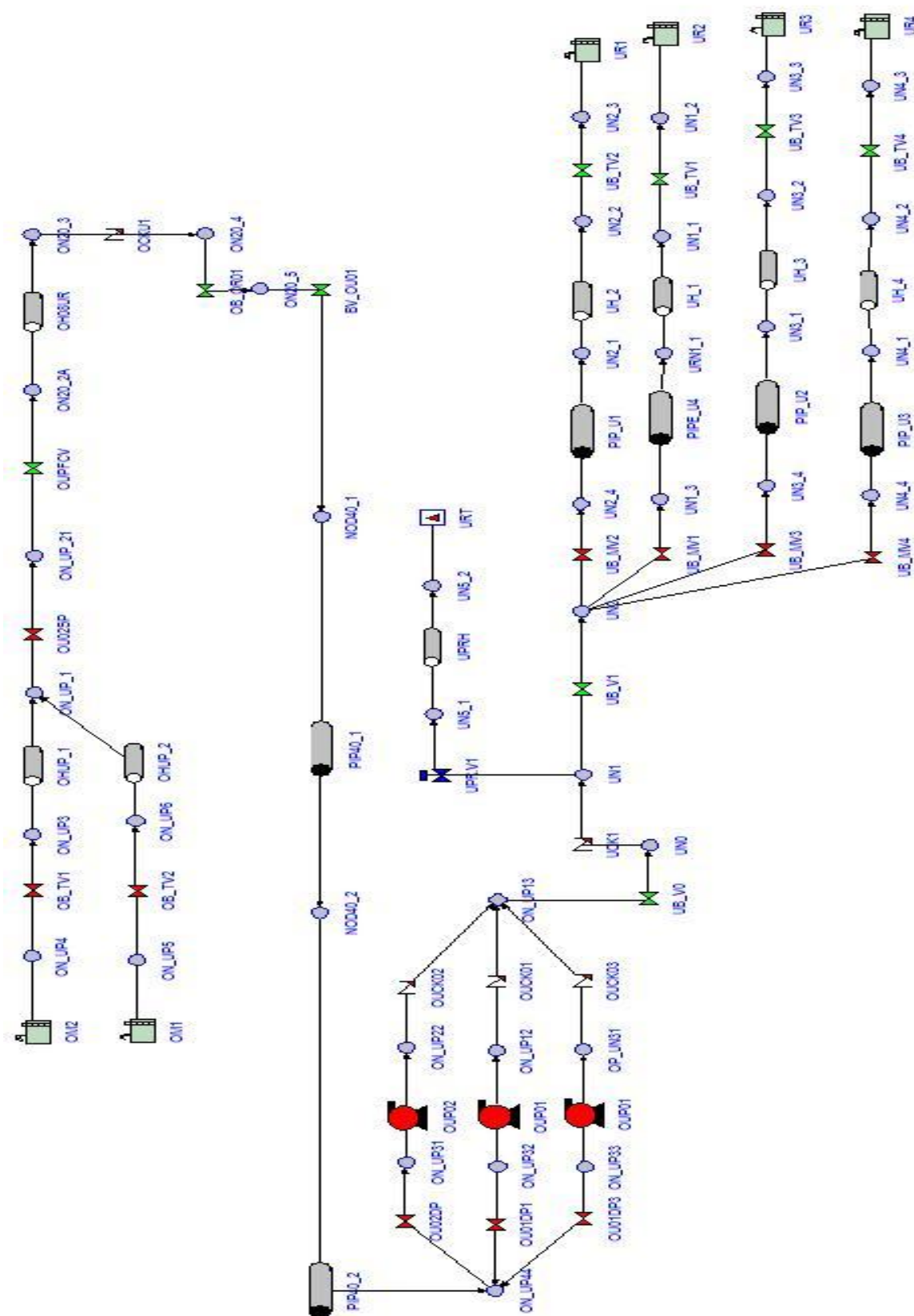
U radu je analiziran problem upravljanja transporta sirove nafte na dionici od Omišlja do Urinja. Sustav transporta nafte prikazan je simulacijskim programom *Stoner Pipeline Simulator* kroz slučajeve pokretanja i prekida transporta nafte te slučajeve kratkotrajnog opterećenja sustava.

Simulacijama je uočeno da su kritični slučajevi kratkotrajnog opterećenja sustava zatvaranje izlaznog (ispusnog) ventila na Omišlju, zatvaranje ulaznog (usisnog) ventila na Urinju te zatvaranje ventila spremnika na Urinja. U prva dva slučaja zadano je vrijeme zatvaranja ventila od 1:30 minuta dok je za treći slučaj 5 minuta. Daljnim simulacijama ustanovilo se da su navedena vremena zatvaranja ventila granična vremena za održavanje stabilnosti sustava. Za vremena zatvaranja ventila kraća od prethodno navedenih tlak premašuje granice dopuštenog (21 bar). U tom slučaju dolazi do puknuća cijevi ili ventila, zbog čega se instalira upravljački sistem.

Pomoću programa *SPS* programiran je upravljački sistem sastavljen od senzora, kontrolera i aktuatora priključenih na pumpu. Pomoću kontrolera moguće je upravljati količinom protoka koja je narinuta sa tlačne strane pumpe, a samim time i tlakom u sustavu, što omogućuje intervenciju u kritičnim situacijama kao što je naglo zatvaranje ventila.

U poglavlju 4. prikazano je direktno upravljanje protokom pumpe i time je postavljeno rješenje glavne problematike ovog rada.

PRILOG 2 (Shema dionice Urinj - Omišalj)



PRILOG 3 (logika upravljanja sustavom u simulacijskom programu SPS)

+ BEGIN.TIME = 0, - zadavanje početnih uvjeta

+ PRESSURE.TOLERANCE = 0.138 /* 2 PSI

/*END.TIME = 500000000000,

COLSEP

MACRO(INIT, TOMUJ)

/*Following directive exports all information to review file that can be

/*used in trend graphs using the GRAFR program

TRENDLIST , P.M = *:P? *:Q? *:P *:Q *:T *:T? *:RPM *:VAL *:CF *:FR

SHARE

PROFILE 14400 /* 10 Days

/* Following directives set the time steps

- postavljanje vrijednosti simulacijskog vremena

/*POKE DTMIN = 0.0016667 , TIME = 0.0

/*POKE DTMAX = 1.0 , TIME = 0.0

SET MINPRES= -90.000000, TIME = 0.0

POKE DTMAX = 0.001

/*SEQUENCES*

- postavljanje redosljeda otvaranja ventila i pokretanja pumpe

DEF.SEQ TOM_UR{

OPEN OB_TV1

OPEN OU01SP, TIME = 0.5

START OUP01

OPEN OU01DP1, TIME = 1.1

OPEN UB_MV1, TIME = 1.1

/*POKE C = 800

}

/* STARTANJE PUMPANJA

SUBMIT.SEQUENCE TOM_UR

LITERATURA

- [1] Riedleder, A., TRANSIENT HYDRAULIC STUDY ON JANAF PIPELINE SYSTEM, 2007.
- [2] Jadranski naftovod,
<http://www.janaf.hr/index.php?option=terminal&lang=hr>, 18.01.2010.
- [3] Kolundžić, S., Plinovodi i naftovodi u Hrvatskoj: strategijska infrastruktura, 2006.
- [4] Izvori energije, <http://www.izvorienergije.com/nafta.html>, 19.01.2010.
- [5] Wikipedija, <http://hr.wikipedia.org/wiki/Nafta>, 19.01.2010.
- [6] Advantica, Stoner Pipeline Simulator Liquid Tutorial, 2007.
- [7] Godišnje izvješće Jadranskog naftovoda,
http://www.teneopr.hr/media/janaf_company_profil.pdf, 22.01.2010